



**EVALUACIÓN DE UNA ESTRUCTURA AISLADA CON CONTROL PASIVO
MAGNÉTICO**

JEISSON DAVID BOTACHE YELA

Código: 1039991

Jeisson.botache@correounivalle.edu.co

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
SANTIAGO DE CALI
2017**



EVALUACIÓN DE UNA ESTRUCTURA AISLADA CON CONTROL PASIVO MAGNÉTICO

JEISSON DAVID BOTACHE YELA

Código: 1039991

Jeisson.botache@correounivalle.edu.co

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director

Ing. Peter Thomson Ph.D.

Profesor de la escuela de Ingeniería Civil y Geomática

Peter.thomson@correounivalle.edu.co

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
SANTIAGO DE CALI
2017**

NOTA DE ACEPTACIÓN

El presente trabajo de grado fue aprobado por el director del Programa Académico, los jurados y el director de investigación.

MANOLO GALVÁN, Ph.D
Director del Programa Académico de
Pregrado en Ingeniería Civil.

PETER THOMSON Ph.D.
Director de Investigación

ALEJANDRA PARRA M.Sc.
Jurado

DANIEL GÓMEZ M.Sc.
Jurado

Ciudad y fecha

Agradecimientos a todo el grupo G7 y al profesor Peter por haberme ayudado en la realización de este proyecto. A mi familia por apoyarme en cada instante y a mis amigos por ofrecerme buenos momentos, en especial a Karol por estar ahí en los malos momentos.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	13
Capítulo 1: EL PROBLEMA.....	15
1.1 Descripción del problema	15
1.2 Formulación	17
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo General.....	17
1.3.2 Objetivos Específicos	18
1.4 Justificación.....	18
Capitulo 2: MARCO DE REFERENCIA.....	20
2.1 Marco teórico	20
2.1.1 Magnetismo	¡Error! Marcador no definido.
2.1.2 Inducción electromagnética y Ley de Faraday	21
2.1.3 Freno de corrientes de Foucault	24
2.1.4 Resistencia a la rodadura.....	29
2.2 Antecedentes y Estado del Arte	30
Capitulo 3: METODOLOGÍA.....	34
3.1 Diseño	34
3.2 Experimentación	38
3.3 Modelo del sistema de control.....	42
Capitulo 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	44
4.1 Resultados experimentales del sistema de control.....	44
Conclusiones	63
TRABAJOS FUTUROS	63
Referencias.....	65

Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Fuerza producida entre imanes (Serway e Jewett, 2013).

Ecuación 2. Ecuación de pérdida de energía debido a frenos por inducción (Fiorillo, 2004).

Ecuación 3. Torque generado por carga eléctrica inducida en un disco giratorio (Ming, 1997).

Ecuación 4. Fuerza generada por carga eléctrica inducida según Wouterse (Ming, 1997).

Ecuación 5. Torque generado por Carga eléctrica inducida según Smythe (Ming, 1997).

Ecuación 6. Relación entre velocidad y velocidad angular por medio del radio.

Ecuación 7. Relación peso W y componente horizontal de la resultante R (Hibbeler, 2013).

Ecuación 8. Relación periodo natural de la estructura T_f y periodo natural del sistema de control T_b (Chopra, 1995).

Ecuación 9. Porcentaje de correspondencia entre una señal discreta y una señal de referencia.

Ecuación 10. Ecuación generada correspondiente a la rigidez del sistema de control.

Ecuación 11. Formula de la función de transferencia para el piso 1 de la estructura Benchmark sin sistema de control acoplado.

Lista de tablas

Tabla 1. Propiedades físicas del aluminio, cobre y zinc

Tabla 2. porcentajes de correspondencia entre la respuesta de los modelos de cada piso y las aceleraciones del ensayo tipo barrido de frecuencias.

Tabla 3. Porcentajes de correspondencia modelo estructura Benchmark.

Tabla 4. Porcentajes de reducción de aceleraciones absolutas máximas con y sin caja de imanes amortiguadores.

Lista de figuras

Figura 1. Comparación (a) rigidez lineal de un material elástico (Serway e Jewett, 2013). (b) rigidez producida por imanes en repulsión.

Figura 2. Sistemas de aislamiento destacados por Hanai (2004).

Figura 3. Líneas de campo magnético para un imán (Urone et al., 2012).

Figura 4. Diagrama básico de las corrientes I inducidas por medio de un imán N con carga B sobre una platina C que se mueve a una velocidad V (wikimedia commons)

Figura 5. Diagrama de fuerza de frenos por inducción (Woodford, 2012).

Figura 6. Reducción de la velocidad de un disco que gira con una fuerza constante dentro de un campo magnético generado por cantidad variable de corriente (Baharom, 2011).

Figura 7. Comparación entre diferentes funciones de disipación de potencia por medio de inducción de corrientes de Foucault, La función de Ming es la que mejor se ajusta a los datos experimentales (Ming, 1997).

Figura 8. Esta demostración para entender el comportamiento de corrientes parásitas o de Foucault y amortiguación magnética. (a) El movimiento de un péndulo conductor que se balancea entre los polos de un imán se amortigua rápidamente por la acción de las corrientes parásitas. (B) Hay poco efecto sobre el movimiento de una placa metálica ranurada, lo que resulta en corrientes de Foucault menos eficaces. (C) No hay amortiguamiento magnético en un péndulo no conductor, ya que las corrientes parásitas son extremadamente pequeñas. (Urone, 2012).

Figura 9. Detalle de una placa conductora ranurada donde se pueden ver corrientes inducidas (Urone, 2012).

Figura 10. Objeto de perfil circular que soporta una carga W y es empujado por una carga F , se crea una resultante R que se opone al movimiento (Hibbeler, 2013).

Figura 11. Plantilla común de un espectro de diseño (Chopra, 1995).

Figura 12. Comparativa de respuesta para un sistema con y sin sistema de control tipo aislamiento bajo cargas excitantes (Kravchuk, 2008).

Figura 13. Diagrama básico del sistema de control.

Figura 14. Disposición de 3 imanes tipo 1 como única fuerza magnética en amortiguar el sistema.

Figura 15. Diagrama básico con amortiguamiento por inducción magnética.

Figura 16. Fotografía del sistema de control.

Figura 17. Fotografía del sistema de control con la estructura Benchmark acoplada y sensores fijados.

Figura 18. diagrama del ensayo de carga-desplazamiento lateral.

Figura 19. Resultados del ensayo de carga-desplazamiento lateral.

Figura 20. Ajuste de los coeficientes a, b y c en la ecuación (9) para ajustarse a los datos obtenidos del ensayo de carga-desplazamiento lateral. Coeficientes de ajuste: $a = 6.3245$, $b = -899.64$, $c = 3.2907 \times 10^4$.

Figura 21. Ajuste en dominio de frecuencias de la respuesta del sistema de control con estructura acoplada bajo excitación en la base tipo barrido.

Figura 22. Estructura de los modelos tipo función de transferencia tipo Hammerstein – weiner.

Figura 23. Ensayo de barrido para la estructura Benchmark sin sistema de control.

Figura 24. Modelo para el piso 1 sin sistema de control

Figura 25, (a) ensayo de barrido al sistema de control sin estructura Benchmark. (b) Acercamiento a la figura 33 en el rango de 60 a 64 seg, las aceleraciones de la mesa sísmica están escaladas al 4%.

Figura 26. Ensayo de barrido al sistema de control trasladado a dominio de frecuencias.

Figura 27. espectrograma de la respuesta del sistema de control bajo carga excitante de barrido de frecuencias.

Figura 28. Respuesta del sistema de control con la estructura Benchmark acoplada bajo carga excitante de barrido.

Figura 29. Dominio de frecuencias de la respuesta del sistema de control bajo carga sísmica tipo barrido y con la estructura Benchmark acoplada.

Figura 30. Comparación en el tiempo respuestas modelo sin sistema de control y ensayo con sistema de control, piso 1.

Figura 31. Dominio de frecuencias de la respuesta producida por el modelo de la estructura sin sistema de control bajo las mismas cargas sísmicas tipo barrido que se ensayaron con el sistema de control.

Figura 32. Respuesta de los 3 grados de libertad de la estructura Benchmark y el sistema de control bajo carga sísmica tipo barrido con amplitud absoluta de 5mm y frecuencia oscilatoria desde 0.2 hasta 12 Hz.

Figura 33. Registros de la figura 32 trasladados a dominio de frecuencias.

Figura 34. Respuesta del sistema de control con estructura Benchmark acoplada bajo el sismo de Armenia.

Figura 35. Sismo de Armenia aplicado al sistema de control sin estructura Benchmark.

Figura 36. Ensayo de barrido aplicado al sistema de control sin imanes amortiguadores.

Figura 37. Dominio de frecuencias para el ensayo de barrido al sistema de control.

Figura 38. Acercamiento a la figura 50 en el segundo 198, las aceleraciones de la mesa sísmica se muestran al 4%.

Figura 39. registro de respuestas del sistema de control con estructura Benchmark acoplada bajo barrido de frecuencias.

Figura 40. Registro de la figura 53 trasladado a dominio de frecuencias.

Figura 41. Respuestas en el tiempo para una excitación tipo barrido, sin caja de imanes amortiguadores.

Figura 42. Dominio de frecuencias de las respuestas para el sistema de control y la estructura Benchmark bajo excitación tipo barrido.

Figura 43. Comparativa en el tiempo para el piso 1 bajo carga sísmica tipo barrido con y sin sistema de control.

Figura 44. Comparativo en el dominio de frecuencias para el piso 1 bajo carga sísmica tipo barrido con y sin sistema de control.

Figura 45. Comparativa en el dominio de frecuencias de la respuesta del sistema de control con y sin caja de imanes amortiguadores.

Figura 46. Ensayos de histéresis en un amortiguador reológico con amperaje variable sobre el electroimán

RESUMEN

En el presente proyecto se diseñó, construyó y caracterizó un sistema de control pasivo tipo aislamiento, el cual afecta de manera considerable el comportamiento de la estructura. El sistema de control construido se divide en cuatro partes: dispositivo de aislamiento, dispositivo de rigidez magnético, dispositivo de amortiguamiento magnético y bases superior e inferior. Dichos dispositivos se acoplan a las bases para formar el sistema de control, el cual se comporta de manera independiente como un sistema de un grado de libertad. El dispositivo de rigidez se compone de imanes en estado de repulsión y el dispositivo de amortiguación utiliza frenos tipo Eddy.

Se realizaron comparaciones entre las respuestas de la estructura Benchmark con y sin sistema de control. El sistema de control logró disminuir más del 90% de las aceleraciones máximas en la estructura con una carga excitante tipo barrido.

PALABRAS CLAVES: sistema de aislamiento, fuerzas magnéticas, sistemas de control pasivo, frenos por inducción de corrientes de Foucault, coeficiente de fricción, rango de reposo.

INTRODUCCIÓN

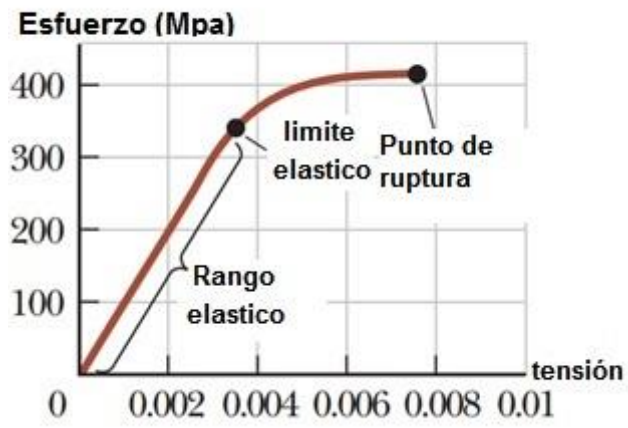
La construcción, que hoy en día es una rama fundamental de la ingeniería civil, ha estado presente desde el origen de los tiempos. Inicialmente las construcciones se realizaban de manera empírica y utilizando técnicas muy rudimentarias, sin embargo, con el paso del tiempo y el perfeccionamiento del conocimiento en las áreas de la ingeniería, se ha logrado desarrollar un protocolo de diseño de estructuras que garantiza la óptima respuesta de las mismas cuando son sometidas a eventos de carácter natural, en especial, eventos sísmicos.

En los últimos siglos se han desarrollado nuevas técnicas de diseño estructural en torno al análisis sísmico, esto con el fin de recrear teórica y experimentalmente el comportamiento que tendrán las estructuras como sistemas dinámicos al ser excitadas bajo cargas sísmicas. Estas labores de control y monitoreo desde el punto de vista sísmico han permitido preservar la vida de miles de personas, quiénes a diario interactúan con todo tipo de estructuras.

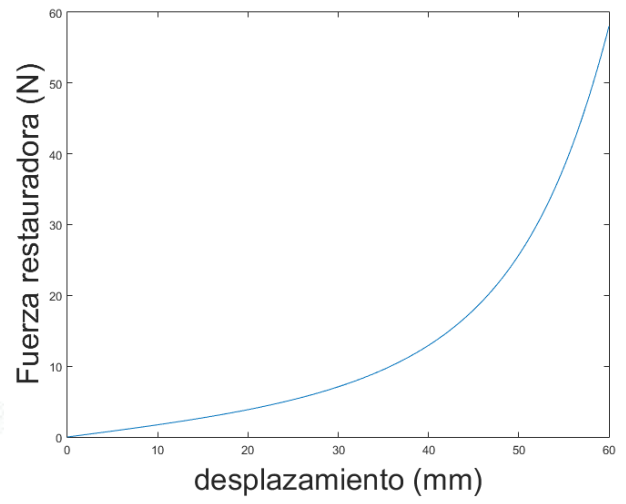
Gómez en el (2008) define los sistemas de control estructurales como métodos alternos utilizados para disminuir las fuerzas internas de una estructura. Los sistemas de control pueden dividirse en activos, pasivos, semi-activos e híbridos dependiendo la cantidad de energía que requieren para su funcionamiento en caso de sismo y en estado de reposo.

El sistema de control que se construyó en este proyecto es de tipo aislamiento pasivo y consiste en aislar la estructura ante movimientos sísmicos a través de un dispositivo de tipo rodillo. Las características esenciales del sistema de control son los dispositivos utilizados para restaurar la posición de la estructura y amortiguarla para interrumpir su vibración. Estos dispositivos hacen uso de las fuerzas magnéticas producidas por imanes permanentes.

Las fuerzas magnéticas tienen una relación desplazamiento-esfuerzo curva y disminuye con el cuadrado de la distancia de separación, a diferencia de los resortes convencionales que tienen relación lineal como se muestra en la figura 1 (Shin, 2014). El dispositivo de aislamiento consiste en esferas de acero que giran sobre un riel paralelo a la dirección de la excitación sísmica. El dispositivo de amortiguación consiste en disponer de una platina de aluminio dentro del campo magnético de un imán de tal manera que exista una velocidad relativa entre la platina y el campo magnético, lo cual induce calor en la platina y amortigua las vibraciones del sistema de control.



(a)



(b)

Figura 1. Comparación (a) rigidez lineal de un material elástico (Serway e Jewett, 2013). (b) rigidez producida por imanes en repulsión.

Capítulo 1: EL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

En los últimos 50 años, Colombia ha sido afectada por aproximadamente 25 sismos de magnitud superior a 5 grados en la escala de Richter, magnitud a la cual el desplazamiento del suelo es perceptible aún para las personas en movimiento. En el periodo mencionado se registraron al menos 3000 pérdidas humanas que fueron causadas por fallas estructurales y desordenes públicos (Armenia, 1999, 1185 muertes) (Cepal, 1999).

Todas las estructuras se encuentran expuestas a diferentes cargas dinámicas, tales como cargas sísmicas, eólicas y antrópicas. Estas causan vibraciones que afectan las condiciones de servicio y pueden llegar a generar el colapso de la estructura. Algunos diseñadores tienden a aumentar la rigidez del sistema estructural como una solución simple a los problemas mencionados, generando como consecuencia, un incremento en los costos y en la masa de la edificación.

Un artículo publicado por la revista DYNA en 2008 con título “sistemas de control para la protección de estructuras civiles sometidas a cargas dinámicas” afirma que la masa de una estructura es un parámetro que tiene gran incertidumbre y que varía continuamente. Además, intentar reducir la masa de la edificación puede provocar costos muy elevados y en ciertos casos no ser justificados (Gomez *et al.*, 2008).

Por estos motivos se crearon los sistemas de control estructural, los cuales modifican las características dinámicas de la estructura en pro de amortiguar o disipar la energía externa que pueda ocasionar fallas estructurales. Los sistemas de control actúan de diferente manera según su tipo. Algunos disminuyen la energía de entrada al sistema estructural por medio de aisladores, mientras que otros utilizan dispositivos adicionales que disipan la energía que haya entrado a dicho sistema. También se pueden diferenciar los tipos de sistemas de control según la cantidad de energía que utilicen para su funcionamiento durante excitación sísmica y en reposo. Los sistemas de control pasivo no requieren de energía para su funcionamiento. Una riostra que está diseñada para deformarse funciona como un dispositivo disipador de energía y puede tomarse como un sistema de control pasivo (Gomez *et al.*, 2008).

Los sistemas de control activos suelen ser más complejos y requieren el uso de sensores que le informan al sistema de control cómo debe actuar para contrarrestar las vibraciones que estén excitando a la estructura. Este tipo de sistemas de control requiere energía externa y en caso de no estar calibrados o configurados correctamente pueden convertirse en una segunda carga excitante negativa de la estructura. Los sistemas semi activos requieren menos energía externa que los sistemas activos y no suelen administrar energía mecánica al sistema. Una cuarta categoría se denomina sistemas de control híbridos. Estos sistemas suelen contar con un

dispositivo pasivo y un dispositivo activo que es retroalimentado con la intención de mejorar algunas de sus características mecánicas (De Oro *et al.*, 2011).

El reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10 no incluye el diseño de sistemas de control estructural, pero permite su uso y remite al diseñador a cumplir normas NEHRP y FEMA (secciones A.3.8 y A.3.9). Además, exige que las estructuras que hagan uso de sistemas de control se sometan a supervisión técnica periódica permanente sin importar su grupo de uso (correcciones NSR-10, 2011).

Los sistemas de control pasivo se denominan así porque su funcionamiento no requiere energía externa, se prefieren este tipo de sistemas ya que en eventos sísmicos se suele perder el suministro de energía. Los sistemas de aislamiento se caracterizan por reducir la energía sísmica que se transmite del suelo a la estructura modificándola mediante baja rigidez lateral. Los sistemas de control tipo aislamiento se dividen en subclases que incorporan apoyos tipo rodillos, láminas apiladas de neopreno o esferas tipo péndulo. La incorporación de amortiguamiento puede incrementar las solicitaciones de la estructura y por lo tanto aumentar las aceleraciones absolutas de ésta, reduciendo así los beneficios del sistema de control (Ramallo *et al.*, 2002).

El incremento de rigidez lateral en un sistema de control tipo aislamiento, produce una disminución en su desempeño y por lo tanto aumentaría la energía que se transmite entre el suelo y la estructura durante un evento sísmico. Hanai (2004) demostró experimentalmente que el uso de amortiguadores en aisladores tipo rodamientos de bola produce un aumento en la rigidez del sistema de control, por lo tanto, la transmisibilidad suelo-estructura resulta ser alta. Se recomendó utilizar este sistema de aislamiento acompañado con amortiguadores suaves y con dispositivos restauradores de posición que permitan mayor desplazamiento relativo.

Hanai hace referencia a tres tipos de sistemas de control tipo aislamiento (figura 2) con diferentes dispositivos para soportar las cargas verticales, restaurar el desplazamiento de la estructura y amortiguar las vibraciones del sistema. Tipo A: soporta verticalmente la estructura por medio de esferas que giran en un cojinete, restaura los desplazamientos por medio de soportes de caucho laminado y amortigua las vibraciones usando amortiguadores viscosos. Tipo B: soporta el peso de la estructura por medio de un sistema de esfera en cojinetes cóncavos, los cuales en caso de carga sísmica restauran el desplazamiento de la estructura haciendo uso de la gravedad. El sistema amortigua las vibraciones por medio de amortiguadores viscosos. Tipo C: soporta la carga vertical de la estructura por medio de cojinetes que se deslizan en una dirección (se necesitan dos pares de cojinetes para deslizarse en dos direcciones) y hace uso de soportes de caucho para restaurar el desplazamiento y amortiguar las vibraciones.








TIPO	TIPO A	TIPO B	TIPO C
SOPORTE	 RODAMIENTO LINEAL LLANO $\mu = 0.0033$ Limite $\delta = \pm 400\text{mm}$	 SOPORTE CÓNICO $\mu = 0.006$ Limite $\delta = \pm 285\text{mm}$	 SOPORTE LISO LLANO $\mu = 0.046$ Limite $\delta = \pm 350\text{mm}$
FUERZA RESTAU- RADORA	 SOPORTE DE CAUCHO LAMINADO $K=38.5\text{N/mm}$ Limite $\delta = \pm 400\text{mm}$	PENDIENTE	 SOPORTE DE CAUCHO $K=31.2\text{N/mm}$ Limite $\delta = \pm 400\text{mm}$
AMORTI- GUADOR	 AMORTIGUADOR VISCOSO Fuerza de amortiguamiento 17kN Velocidad límite 75cm/s Limite $\delta = \pm 500\text{mm}$	 AMORTIGUADOR VISCOSO Fuerza de amortiguamiento 12 kN Velocidad límite 75cm/s Limite $\delta = \pm 285\text{mm}$	—

Figura 2. Sistemas de aislamiento destacados por Hanai (2004).

Los mecanismos que restauran los desplazamientos en los sistemas de control tipo aislamiento tienen características elástico-lineales. Además, son mecanismos de contacto, por lo tanto, la energía que no se amortigua en el sistema de control sigue siendo alta (Behrooz *et al.*, 2014).

1.2 Formulación

¿Cómo se comporta una estructura aislada sísmicamente si los desplazamientos relativos son controlados por fuerzas magnéticas?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento de un sistema de aislamiento sísmico que utiliza fuerzas magnéticas para restaurar los desplazamientos relativos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar la distancia optima a la que los imanes no rigidizan en exceso el sistema de control, pero si restauran la estructura a su posición original.
- Caracterizar el comportamiento dinámico del sistema de control.
- Comparar la respuesta del sistema estructural con y sin el sistema de control propuesto.

1.4 Justificación

Las estructuras civiles tales como edificios y puentes, son una parte íntegra de la sociedad moderna. Tradicionalmente, dichas estructuras han sido diseñadas para soportar cargas estáticas y cargas dinámicas sísmicas, marítimas, eólicas e incluso vibraciones producidas por el tráfico. Estas cargas dinámicas pueden causar detrimento a la integridad de la estructura. Así pues, con el fin de proteger las estructuras y sus ocupantes, se crean e implementan los sistemas de control.

El sistema de control que se abarca en éste proyecto es de tipo aislamiento de base, este tipo de sistema de control se consiste en instalar dispositivos entre la cimentación y la estructura lo cual desacopla parcialmente la estructura. Estos dispositivos se deforman y absorben parte de la energía sísmica que llega al sistema. Se pueden diseñar sistemas de control tipo aislamiento si se tiene información concreta del sismo de diseño, como lo es la aceleración máxima y los desplazamientos de suelo esperados. Estos valores se pueden calcular tomando en cuenta los estratos de suelo y usando el histórico sísmico de la zona.

Cuando se utilizan aislamientos estructurales se pueden reducir las secciones transversales de la mayoría de los elementos estructurales, ya que la carga sísmica que deben soportar es menor, esto trae consigo un beneficio económico. Ya que existe cierta libertad en la posición de los dispositivos de rigidez y amortiguamiento que requiere el sistema de control, estos se pueden diseñar de tal manera que se reduzcan los problemas por excentricidades en planta. La aplicación de sistemas de control tipo aislamiento presenta altos costos en su inversión inicial. Costos que en caso de evento sísmico pueden ser amortizados con costos menores de reparación o pérdidas de vidas. Se debe anotar que gran parte del foco demográfico de nuestro país se encuentra ubicado en regiones consideradas de alta vulnerabilidad sísmica

Los sistemas de control tipo aislamiento pasivo son los más fáciles, confiables y costo-efectivos sistemas de control estructural, que pueden ser usados para proteger edificios y puentes de efectos dañinos provocados por excitaciones sísmicas. Estos sistemas han sido adoptados a gran escala en las últimas décadas como la técnica predominante para mitigar los efectos sísmicos en estructuras nuevas y antiguas en regiones propensas a sufrir sismos.

La efectividad de los sistemas de control tipo aislamiento fue comprobada en el año 1994 cuando un sismo de magnitud 6.7 grados en la escala de Richter azotó la ciudad de Los Ángeles (EU), Tras el evento natural solo uno de los diez hospitales afectados en la zona continuó en servicio, este tenía instalados aisladores sísmicos. Los sistemas de control tipo aislamiento suelen diseñarse para estructuras de alturas bajas y medias, ya que el objetivo de usar aislamiento sísmico es aumentar el periodo fundamental de la estructura y así reducir la aceleración sísmica de diseño. En estructuras altas el periodo fundamental es alto y por lo tanto la reducción de la aceleración de diseño no es suficiente para considerar usar aislamiento sísmico (Gomez *et al.*, 2008).

La mayoría de los sistemas de control tipo aislamiento cuentan con elementos cuya vida útil es impredecible debido a la gran cantidad de factores que pueden alterar su funcionamiento adecuado: errores de fabricación, desorganización en el tiempo entre mantenimientos, mantenimientos inapropiados, fallas debidas a excitaciones sísmicas y las demoras para remediarlas, por estas razones se busca aplicar soluciones de sistemas de control que requieran el menor acompañamiento humano posible.

Un interés a largo plazo del proyecto es fomentar la investigación de sistemas de control novedosos, extender los conocimientos actuales con simulaciones teóricas y ensayos experimentales que los apoyen.

Capítulo 2: MARCO DE REFERENCIA

2.1 Marco teórico

2.1.1 Fuerza entre dos polos magnéticos

Los imanes poseen en el espacio que los rodea una fuerza que es capaz de actuar sobre otras sustancias magnéticas u otros imanes. El espacio que rodea un imán es llamado "campo magnético externo". Por lo que entonces, un campo magnético es una región donde actúan fuerzas magnéticas. La figura 3 muestra una representación del patrón formado por limaduras de hierro alrededor de una barra magnetizada, el cual representa el campo magnético alrededor de ella. Los imanes, sin importar su tipo (artificiales permanentes, electroimanes o naturales), cuentan con un polo positivo y un polo negativo (Urone *et al.*, 2012).

La fuerza de atracción o repulsión entre dos polos magnéticos varía con la distancia entre ellos. Es decir, cuando los polos están separados una distancia considerable no se pueden notar los efectos que un polo provoca en el otro. Ahora, la fuerza de atracción o de repulsión entre dos imanes, también varía con la cantidad de fuerza que un polo "individual" de los imanes es capaz de ejercer. Es decir, esta fuerza varía con la fuerza de los polos. A su vez que ésta última depende del tamaño, del material del cual está hecho y de su grado de magnetización.

Como se puede observar en una brújula, la aguja que puede ser un imán (natural o artificial, o una lámina imantada), al poder moverse libremente (suspendida en aire, o flotando en algún líquido, o soportada en un punto donde rote sin mucho esfuerzo) al ponerse en la presencia de un campo magnético, ella se alinearán con las líneas de campo de mayor intensidad y señala hacia dónde se encuentra el hemisferio norte. La intensidad del campo magnético terrestre permite usar estos elementos para este propósito.

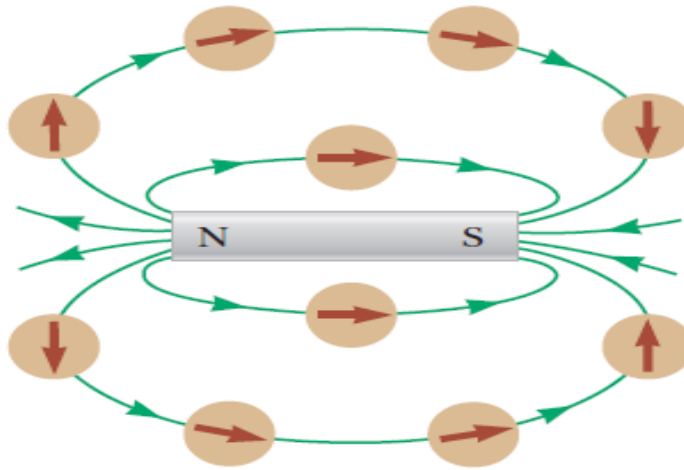


Figura 3. Líneas de campo magnético para un imán (Urone et al., 2012).

Experimentalmente se halló que la fuerza mutua entre dos polos de magnitudes conocidas, se puede expresar matemáticamente de manera semejante a la expresión usada por Coulomb para describir la fuerza electrostática entre dos partículas cargadas (Serway e Jewett, 2013). Esta fuerza entre dos polos magnéticos puede ser de atracción o de repulsión dependiendo de si las magnitudes de los polos tienen signos opuestos o iguales (1). Es importante aclarar que un polo es alguna cantidad de carga magnética concentrada en un punto. Este concepto es imaginario dado que en la naturaleza no es posible hallar monopolos magnéticos y las cargas magnéticas siempre se encuentran distribuidas sobre áreas finitas y no en puntos concentrados (Winn, 2010).

$$F = \frac{1}{4 \pi \mu_0} \frac{|m_1| |m_2|}{r^2} \quad (1)$$

Donde:

μ = constante de permeabilidad magnética del medio donde están ubicados los polos magnéticos

r = distancia entre los polos magnéticos

m = magnitud de los polos magnéticos

F = Magnitud de la fuerza magnética entre dos polos magnéticos

2.1.2 Inducción electromagnética y Ley de Faraday

Una fuerza electromotriz (fem) produce una corriente. Haciendo uso del magnetismo mediante la inducción electromagnética se origina una corriente llamada corriente inducida. El principio de inducción electromagnética dice que cuando hay movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético, se inducirá un voltaje en el conductor; el movimiento puede ser producido moviendo el conductor a través de un campo magnético estacionario o viceversa. El voltaje inducido también se conoce como fem inducida. Respecto a la ley de Faraday, Feynman la citó de la siguiente manera: "En una región donde el campo magnético está cambiando con el tiempo,

se generan campos eléctricos. Es el campo eléctrico el que impulsa a los electrones a través del alambre y por lo tanto es responsable de la fem en un circuito estacionario cuando hay un flujo magnético cambiante." (Feynman *et al.*, 2013).

Considérese un campo magnético variable, que sea perpendicular a uno de los lados de una placa conductora. El campo eléctrico inducido en el conductor producirá en su interior corrientes eléctricas inducidas, las cuales se les denomina como 'corrientes de Foucault' o corrientes en remolino (Eddy currents en inglés). Las corrientes de Foucault se producen de igual manera cuando un conductor se mueve en una región en la que existe un campo magnético, la figura 4 ilustra de manera más eficiente las características de las corrientes de Foucault.

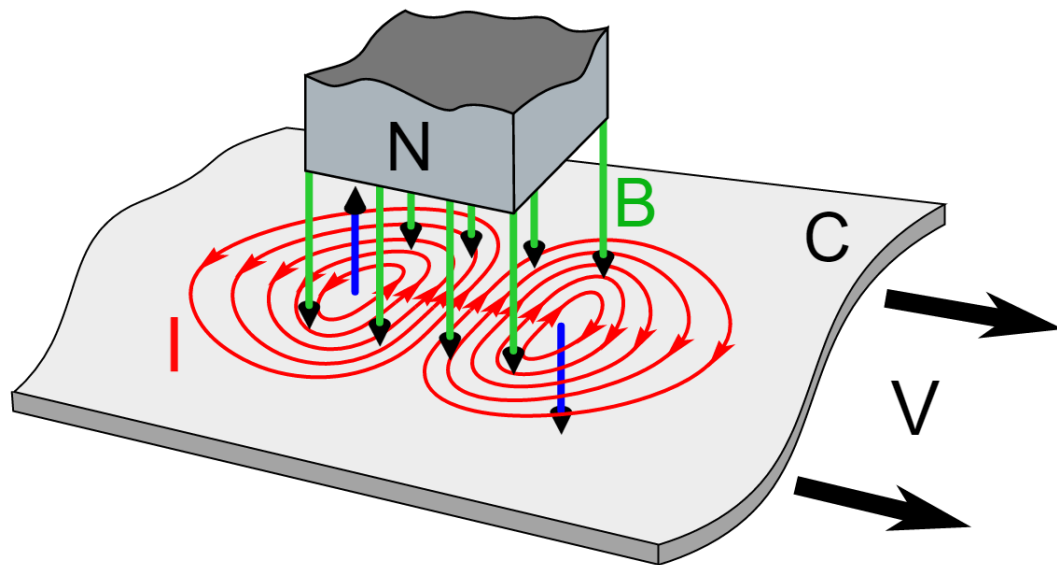


Figura 4. Diagrama básico de las corrientes I inducidas por medio de un imán N con carga B sobre una platina C que se mueve a una velocidad V (wikimedia commons)

Un sistema que genere corrientes de Foucault puede ser tan sencillo como un tubo de cobre o una platina de aluminio que se mueve en el área del campo magnético provocado por un imán. La figura 4 ilustra un imán en el cual sus líneas de campo magnético van dirigidas hacia una placa., la placa está moviéndose con una velocidad V . La dirección de las corrientes de Foucault I está dada por la ley de Lenz, la cual afirma que las corrientes inducidas en el material conductor tienen dirección tal que crean un campo magnético que se opone al cambio de flujo magnético (Serway e Jewett, 2013).

La figura 4 muestra las Corrientes de Foucault I , que se pintan de color rojo, las cuales son inducidas en una placa metálica conductora C , cuando la lámina se mueve bajo un imán con su polo Norte como se muestra. El campo magnético B en verde se dirige hacia abajo a través de la placa. El campo magnético creciente desde la perspectiva de la platina, en el borde izquierdo del imán induce una corriente en sentido contrario a las manecillas del reloj, que por la ley de Lenz crea su propio campo magnético (flecha azul izquierda) dirigida hacia arriba, que se opone al

campo del imán produciendo una fuerza retardante. Del mismo modo, el campo magnético decreciente en el borde derecho del imán, crea una corriente en sentido horario y un campo contrario cuya flecha de color azul descende de la placa produciendo también una fuerza de retardo.

Para ver el efecto de estas corrientes de Foucault en una aplicación directa se podría pensar en detener un tren que avanza a gran velocidad usando corrientes de Foucault, en lugar de aplicar frenos de fricción a las ruedas. En la figura 5 se puede ver que a medida que el tren se aproxima al imán, las corrientes parásitas son inducidas en la parte delantera del tren y producen un campo magnético repulsivo, lo que reduce su acercamiento. Si el tren se está moviendo muy rápido, el imán puede no detenerlo por completo, por lo que seguirá moviéndose un poco más lejos. Sin embargo, cuando sobrepasa el imán, las corrientes de Foucault inducidas producirán un campo magnético atractivo que intenta tirar del tren hacia atrás.

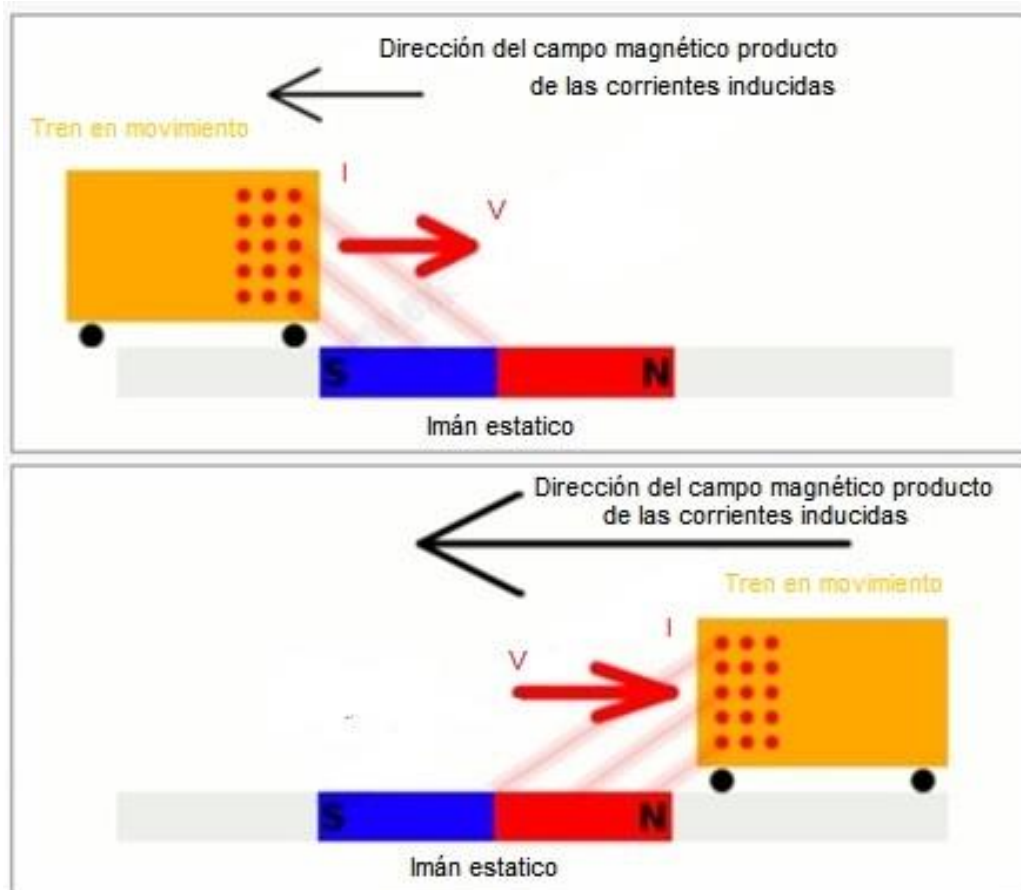


Figura 5. Diagrama de fuerzas que participan en la interacción de un tren que traspasa el área de un campo magnético producido por un imán con una velocidad V . Las corrientes inducidas I se muestran parcialmente para facilitar el entendimiento de la interacción. Las corrientes inducidas abarcan todo el tren (Woodford, 2012).

2.1.3 Freno de corrientes de Foucault

Una unidad de freno utilizada en trenes y otros vehículos de carga como camiones y autobuses, es el freno de corrientes de Foucault, o sencillamente freno de Foucault. Este mecanismo usa la inducción electromagnética para generar corrientes de Foucault. Estas corrientes producen resistencia, la cual es utilizada para detener el vehículo. Un electroimán genera un campo electromagnético alrededor de las ruedas de metal que están girando, produciendo como consecuencia corrientes de Foucault. Estas corrientes de Foucault al hallar resistencia al pasar por el metal disipan la energía en forma térmica y disminuyendo la velocidad de las ruedas. La resistencia generada por los frenos de corrientes de Foucault se incrementa a mayor velocidad y se reduce a velocidades bajas; esto crea un efecto de frenado gradual. Algunas herramientas eléctricas como taladros y sierras eléctricas utilizan un sistema similar a los frenos de Foucault para detener más rápidamente sus piezas móviles (ming, 1997).

Entre las ventajas del sistema de frenado mediante corrientes de Foucault está el bajo desgaste por uso, como no ocurre con las pastillas de frenos convencionales. Esto debido a la ausencia de contacto físico entre la rueda y el dispositivo de frenado. Adicionalmente, a altas velocidades es un sistema muy fiable como frenado regular y de emergencia. Sin embargo, tienen la desventaja de no ser muy efectivos a bajas velocidades, por lo que se debe usar un freno de seguridad por fricción cuando el vehículo o sistema esté inmóvil.

La corriente inducida por el campo magnético desaparece convirtiéndose en calor, creando así un sistema de amortiguamiento sin fricción. La energía disipada no es fácilmente calculable, sin embargo, Fiorillo (2004) experimentó con los frenos por inducción de corrientes de Foucault y construyó una fórmula aproximada para calcular la pérdida de potencia para este tipo de sistemas:

$$P = \frac{\pi^2 B_p^2 d^2 f^2}{6 k \rho D} \quad (2)$$

Donde:

P : potencia perdida por unidad de masa (W/kg)

B_p : campo magnético pico (T)

D : espesor de la platina o diámetro del alambre (m)

F : frecuencia (Hz)

K : constante igual a 1 para platinas y 2 para alambres.

ρ : resistividad eléctrica del material ($\Omega \text{ m}$)

D : densidad del material (kg/m^3)

El autor aclara que esta ecuación es un acercamiento a la realidad y no debería ser usada para diseñar la versión final de sistemas que haga uso de los sistemas de frenado tipo Eddy. La versión final de estos sistemas debe ser producto de análisis experimentales que simulen diferentes condiciones atmosféricas, condiciones de uso y deterioro de piezas.

La ecuación (2) se puede acompañar con la investigación realizada por Baharom (2011), el cual ensaya con discos de diferentes materiales que rotan respecto a un eje mediante un mecanismo que los hace girar a unas RPM constantes, cuando se acerca un campo magnético al disco, éste se ve ralentizado por las corrientes de Foucault inducidas por el campo magnético. En el estudio se usaron discos de aluminio, cobre y zinc, con las propiedades físicas siguientes:

Tabla 1. Propiedades físicas del aluminio, cobre y zinc.

Material	Resistividad ($\times 10^{-8} \Omega \text{ m}$)	Densidad (kg/m^3)
Aluminio	2.82	2,700
Cobre	1.68	8,940
Zinc	5.90	7,000

Como se puede ver en la ecuación (2), la potencia disipada y convertida en calor aumenta si el producto de la resistividad y la densidad es el menor posible. Además, la disipación de potencia es proporcional al pico del campo magnético del imán inductor, por ello, como se muestra en la figura 6, es el disco de aluminio el que más se ralentiza cuando se le inducen corrientes eléctricas (mientras que los discos tengan las mismas dimensiones y estén igualmente alejados del polo magnético).

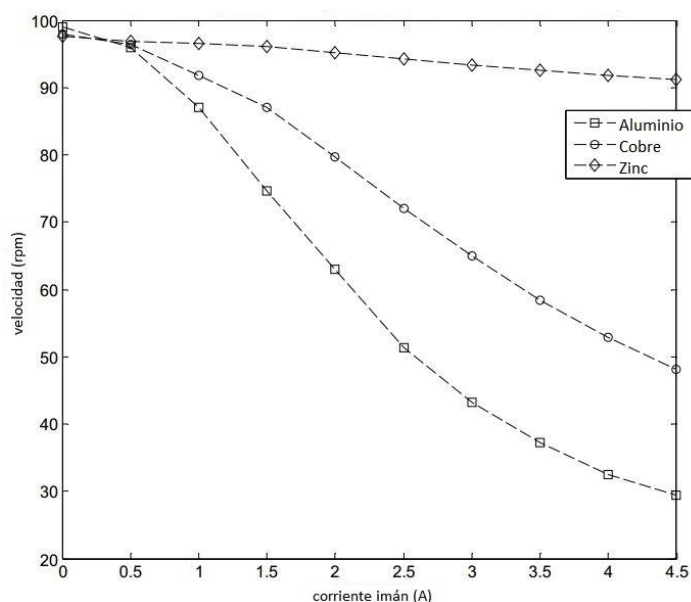


Figura 6. Reducción de la velocidad de un disco que gira con inicialmente a velocidad constante pero es ralentizado al inducirle corrientes eléctricas mediante un campo magnético generado por cantidad variable de corriente (Baharom, (2011)).

Otro autor que investigó la relación entre velocidad y fuerza de amortiguamiento fue Ming (1997), quien rechaza las ecuaciones de autores anteriores y en su lugar construye una función de amortiguamiento a partir de datos recogidos. Ming define la función de torque generado sobre un disco de radio R por medio de inducción magnética a partir de la ecuación (3) que traza la gráfica de la figura 7. La ecuación de Ming presenta un acercamiento a la predicción de la fuerza de amortiguamiento que poseerán los frenos por inducción de corrientes de Foucault en función de la velocidad relativa entre polo magnético y conductor.

$$T(\omega) = \frac{K_1 * \omega}{\left(1 + \frac{K_2 * \omega^2 + K_3 * \omega^4}{1 + K_4 * \omega + K_5 * \omega^3}\right)^2} \quad (3)$$

Donde:

T=torque generado

ω =velocidad angular

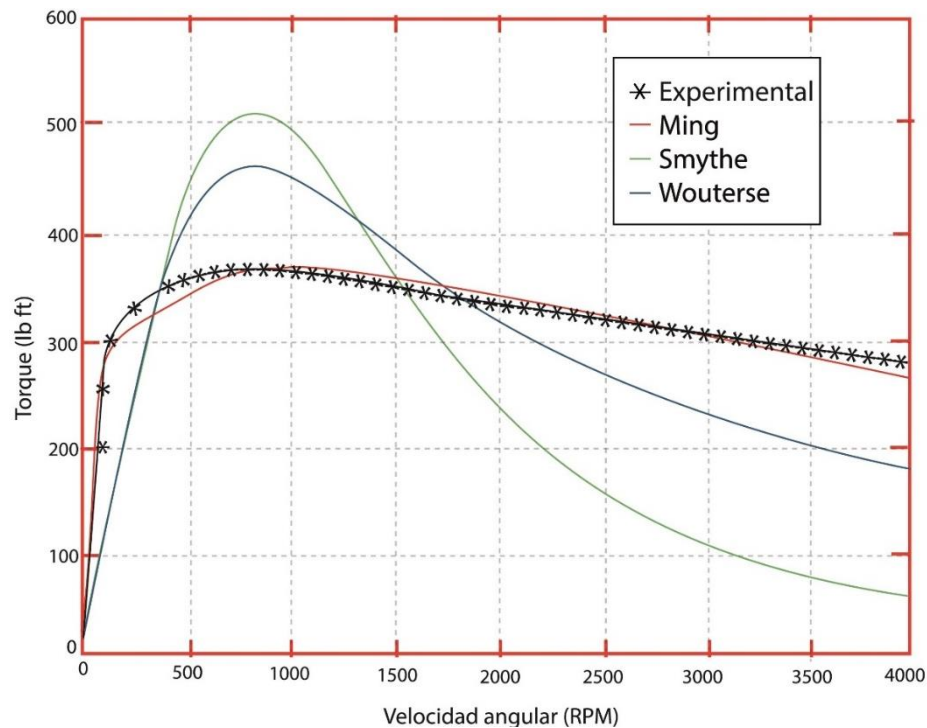


Figura 7. Comparación entre diferentes funciones de disipación de potencia por medio de inducción de corrientes de Foucault, La función de Ming es la que mejor se ajusta a los datos experimentales (Ming, 1997).

El autor señala que los coeficientes K de la ecuación (3) deben ser hallados para cada proyecto que haga uso de la inducción magnética, ya que el mínimo cambio en las condiciones altera progresivamente la función. Las ecuaciones que Ming rechaza son las de Wouterse (4) y Smythe (6) mostradas a continuación:

$$Fe(v) = \frac{C}{\frac{V_k}{v} + \frac{v}{V_k}} \quad (4)$$

$$T(w) = \frac{C_1 * w}{(C_2 + C_3 * w^2)^2} \quad (5)$$

$$v = w * R \quad (6)$$

Donde:

C: valores constantes dependientes de geometría, propiedades magnéticas entre otros

V_k: velocidad crítica de inducción (velocidad correspondiente al valor máximo en la figura 7). si el circuito al que se induce corriente es giratorio, se debe hacer la conversión desde Rpm o velocidad angular.

R: radio del disco de ensayo.

Las variables cruciales para el correcto funcionamiento de los sistemas que utilicen disipadores de potencia por medio de inducción magnética son:

- Distancia del polo magnético a la platina.
- Geometría de la platina, si es una platina es importante el espesor, el ancho y largo de la misma. Es recomendable que no esté perforada o que haya otras platinas en las inmediaciones del campo magnético.
- Pico del campo magnético, si el imán es de alta potencia se inducen más corrientes eléctricas en la platina y se disipa más potencia.
- Ángulo de inducción, si el ángulo entre el plano de la platina y las del campo magnético no es perpendicular, el valor de la corriente eléctrica / no está optimizado (figura 4).

Si la Fem de movimiento puede causar un bucle de corriente en el conductor, hablamos de esa corriente como una corriente de Foucault, como se había mencionado anteriormente. Las corrientes de Foucault pueden producir un arrastre significativo, llamado amortiguamiento magnético, en el movimiento implicado. En la demostración de la figura 8 se muestra un péndulo compuesto por una platina que oscila entre los polos de un imán fuerte. Si la placa es metálica, hay un arrastre sustancial cuando entra y sale del campo, amortiguando rápidamente el movimiento. Sin embargo, si la placa de metal está ranurada, hay un efecto mucho menor debido al imán. No hay ningún efecto discernible en ella si está hecha de material aislante (Urone, 2012).

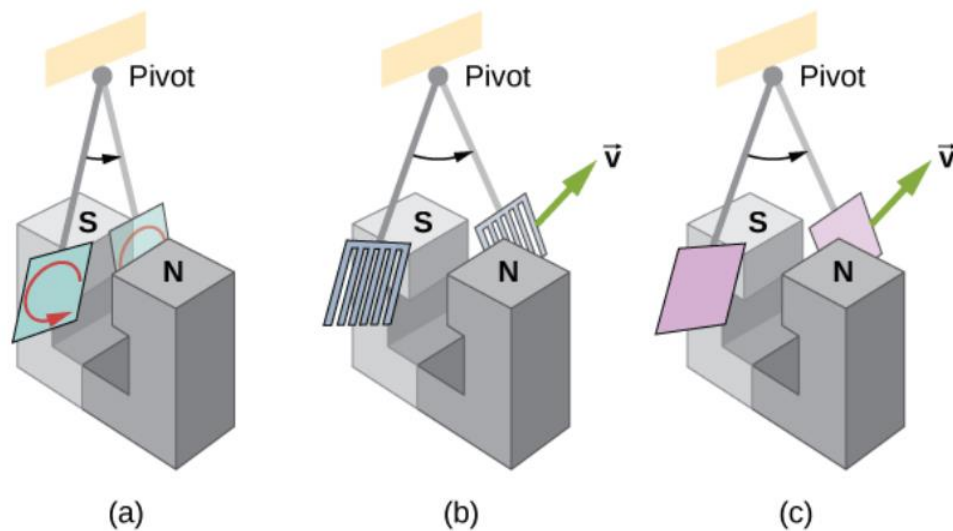


Figura 8. Esta demostración para entender el comportamiento de corrientes parásitas o de Foucault y amortiguación magnética. (a) El movimiento de un péndulo conductor que se balancea entre los polos de un imán se amortigua rápidamente por la acción de las corrientes parásitas. (B) Hay poco efecto sobre el movimiento de una placa metálica ranurada, lo que resulta en corrientes de Foucault menos eficaces. (C) No hay amortiguamiento magnético en un péndulo no conductor, ya que las corrientes parásitas son extremadamente pequeñas. (Urone, 2012).

Como se puede ver en la figura 9, se generan corrientes de Foucault inducidas formando pequeños bucles en una placa de metal ranurada, la cual entra en un campo magnético y las fuerzas sobre las corrientes tienden a cancelarse. En consecuencia el arrastre magnético es casi nulo (Urone *et al.*, 2012).

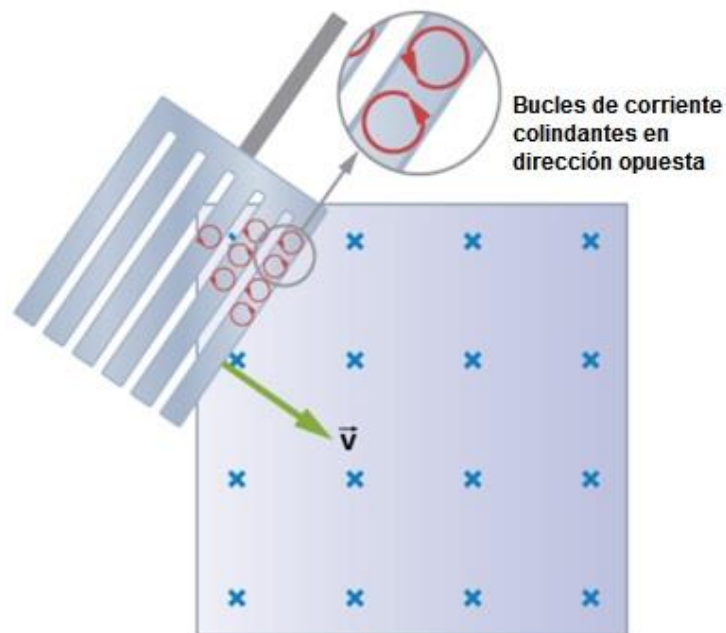


Figura 9. detalle de una placa conductora ranurada donde se pueden ver corrientes inducidas. (Urone, 2012).

2.1.4 Resistencia a la rodadura

Hibbeler (2013) afirma que cuando se aplica fuerza lateral a un objeto en reposo, éste estará sujeto a la posibilidad de trasladarse de dos maneras:

1. Deslizarse sobre la superficie de contacto manteniendo el área de contacto constante.
2. Rodar respecto a un eje perpendicular al movimiento

La manera en que el objeto se traslada depende de la geometría del mismo, la distancia entre el punto donde se aplica la fuerza y la base, de la fricción de contacto y de rodadura.

Si el objeto tiene un perfil geométrico circular (un cilindro, por ejemplo) se tiene casi la completa seguridad que dicho objeto va a trasladarse rodando en lugar de trasladarse por deslizamiento. Esto es debido a la teoría de fricción de rodadura, la cual indica que un objeto de radio r girará respecto a un eje perpendicular al movimiento si se le aplica una fuerza F superior a la componente paralela a F del vector de resultante R . La figura 10 muestra que la componente R se produce al deformar el suelo o base mediante una carga normal W , en el caso mostrado se representa deformación en el suelo, pero también puede ocurrir deformación en el objeto que rueda, como es el caso de las llantas de goma en concreto rígido.

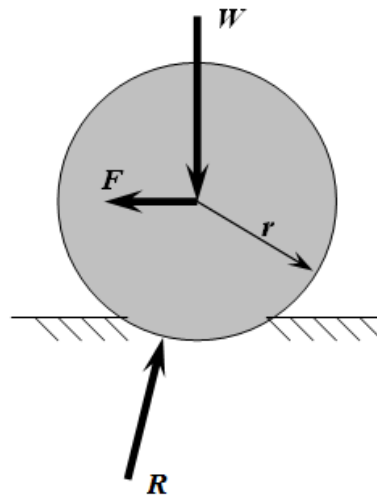


Figura 10. Objeto de perfil circular que soporta una carga W y es empujado por una fuerza F , se crea una resultante R que se opone al movimiento (Hibbeler 2013).

La componente horizontal de la resultante R será inversamente proporcional a la dureza del objeto a rodar y a la dureza del suelo o base. Es decir, ruedas de goma sobre arena generan una componente horizontal mayor en comparación a ruedas de acero sobre rieles de acero, sistema que usan los trenes de carga. La magnitud de la componente horizontal de la resultante R es función de la carga W y se describe en la ecuación 7:

(7)

$$F = \frac{W a}{r} \equiv W * C_{rr}$$

Dónde:

W : peso soportado por el objeto a rodar (N)

a : coeficiente de resistencia a la rodadura (m)

r : radio del objeto a rodar (m)

C_{rr} : coeficiente de resistencia a la rodadura

Debido a que, técnicamente, la fricción por rodadura no es una fricción en el sentido de la palabra sino un aumento y disminución de compresión entre las partículas del objeto a rodar. Estas últimas poseen histéresis a la deformación por compresión, es decir, rigidez axial.

2.2 Antecedentes y Estado del Arte

El sistema de aislamiento ideal sería aquel que mantuviese la estructura sin contacto con el suelo y estable ante movimientos en la base. Una forma posible para lograrlo sería por medios magnéticos, pero Bassani (2006) concluyó experimentalmente que bajo ninguna configuración en el arreglo de imanes permanentes puede obtenerse un sistema de levitación que sea totalmente estable en todos los modos rotacionales y de traslación. Varios métodos de estabilización son factibles, sin embargo, aquellos métodos son sistemas de control activo y necesitarían inmensas cantidades de potencia.

Anil K. Chopra (1995) explica porqué los sistemas de aislamiento deben tener baja rigidez lateral. El sistema de aislamiento en la base se toma como una capa de baja rigidez lateral entre el suelo y la estructura, mediante esta capa la estructura amplía el periodo natural de su primer modo de vibración (8) y, al ampliar el periodo natural se disminuye la aceleración de diseño en el espectro de respuesta (Figura 11) pero aumenta el desplazamiento. Ese desplazamiento corresponde en mayor medida al desplazamiento del sistema de aislamiento y no a la deriva de la estructura.

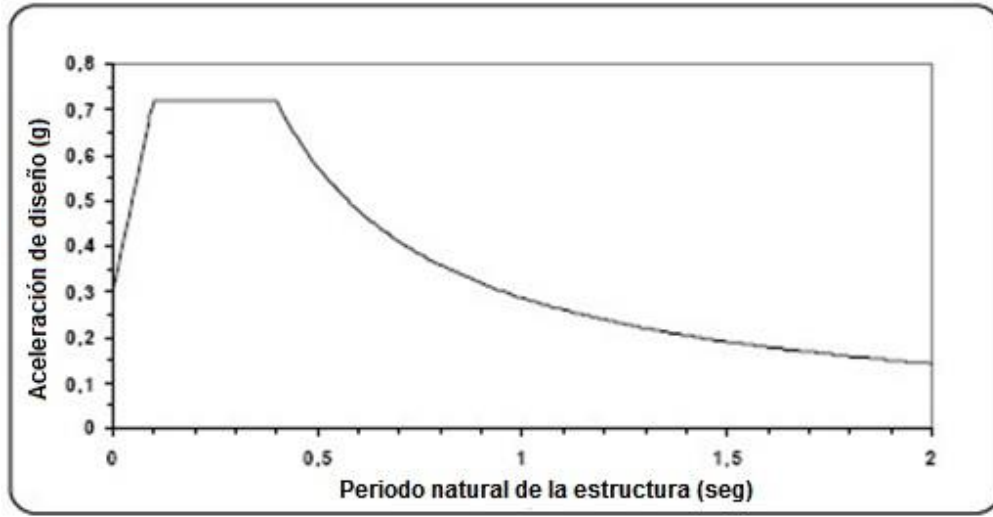


Figura 11. Plantilla común de un espectro de diseño (Chopra, 1995).

Para que un sistema de aislamiento funcione como es esperado el periodo natural de la estructura (T_f) debe ser mucho menor, con respecto al periodo natural de sistema de aislamiento T_b , es decir:

$$\begin{aligned}
 T_b &\gg T_f \\
 \frac{2\pi}{w_b} &\gg \frac{2\pi}{w_f} \\
 w_b &\gg w_f \\
 \sqrt{\frac{k_b}{m + m_b}} &\gg \sqrt{\frac{k_f}{m}}
 \end{aligned} \tag{8}$$

Ya que la masa del sistema de aislamiento (m_b) es muy baja con respecto a la masa de la estructura (m), la desigualdad se puede reducir a:

$$k_b \ll k_f$$

Siendo k_b la rigidez del sistema de aislamiento y k_f la rigidez del primer modo de vibración de la estructura.

Adicionalmente, Chopra hace énfasis en que en ciertas ocasiones pueden ocurrir sismos que lleven al sistema de aislamiento a condiciones de resonancia, haciendo que la transmisibilidad suelo-estructura sea amplificada en vez de disminuida. Para que esto ocurra el sismo debe ser de baja frecuencia (ej: sismo de México, 1985) y el sistema de aislamiento debe presentar rigidez lineal.

Uno de los sistemas de control que se asemeja al propuesto en este proyecto es el aislamiento de tipo péndulo, Kravchuk (2008) demostró las características de estos dispositivos, concluyendo que: “el amortiguamiento de la estructura sin sistema de control fue de 1.6%, mientras que la estructura con el dispositivo de aislamiento acoplado presentó una razón de amortiguamiento de 8.5%”. Como se muestra en la Figura 12, la aceleración máxima medida en el piso superior de la estructura se redujo en un 55% para vibración forzada.

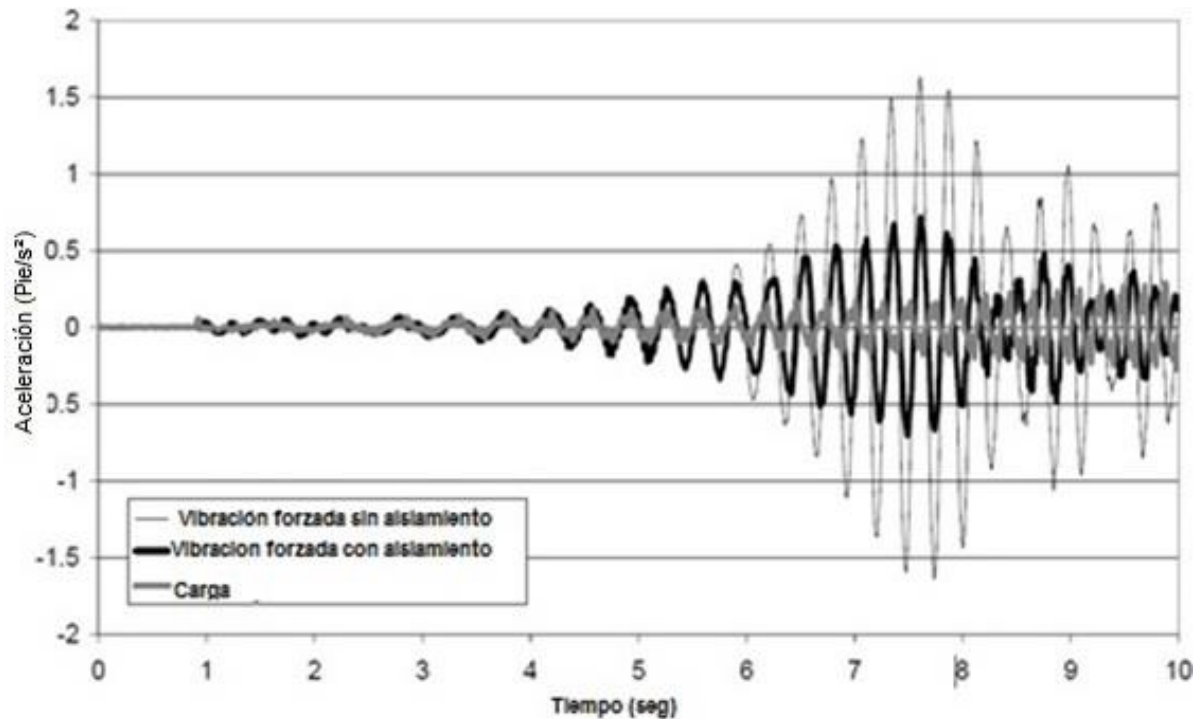


Figura 12. Comparativa de respuesta para un sistema con y sin sistema de control tipo aislamiento bajo cargas excitantes (Kravchuk, (2008).

Gomase (2011) investigó el desempeño de un sistema de aislamiento sísmico sin elasticidad lineal. Aunque el estudio tuvo un enfoque teórico, se encontró que en promedio la cortante basal para un sistema aislado es aproximadamente el 40% del mismo sistema sin aislamiento. Además, se hace énfasis que el sismo de diseño no debe exceder el desplazamiento máximo del sistema de aislamiento, ello puede ocasionar fallas críticas en los apoyos estructurales y el colapso de la estructura

La simulación teórica llevada a cabo en ésta investigación consistió en un ajuste del modelo teórico a partir de ensayos experimentales reales. Así lo declara Vélez (2009), al señalar que el propósito del ajuste de modelos es modificar los parámetros de masa, rigidez y amortiguamiento del modelo numérico con el fin de obtener una mejor aproximación entre los resultados numéricos y la información experimental obtenida. El autor considera los errores que deben corregirse al ajustar modelos teóricos:

1. Errores en la estructura del modelo: los cuales se presentan cuando existe incertidumbre en las ecuaciones físicas gobernantes (como en el modelado de sistemas con un fuerte comportamiento no lineal).
2. Errores en los parámetros del modelo: dentro de los que se encuentra la aplicación de condiciones de frontera inapropiadas, así como suposiciones imprecisas empleadas para simplificar el modelo.
3. Errores en el orden del modelo: cuya ocurrencia se debe a la discretización de sistemas complejos, la cual puede producir modelos de orden insuficiente.

Capítulo 3: METODOLOGÍA

3.1 Diseño

Durante la ejecución de este trabajo no se hallaron referencias de otros proyectos en que se experimentaran fuerzas magnéticas como mecanismo utilizado para restaurar los desplazamientos de un sistema, por lo tanto, la presente investigación tuvo diferentes versiones que empíricamente mejoraron el desempeño del sistema de control. En el análisis de resultados sólo se analiza la última versión.

El diseño del sistema de control consiste en cumplir la premisa básica de los sistemas de control tipo aislamiento: La estructura Benchmark (se presentan detalles geométricos en el anexo 1) debe estar soportada verticalmente, el sistema debe ser capaz de regresar a su punto de desplazamiento cero, ya que se agrega esta componente de rigidez también debe agregarse una componente de amortiguamiento. El proyecto abarca estos puntos por medio de: esferas de acero sobre rieles para soportar la estructura verticalmente con la menor fricción posible, imanes en estado de repulsión para restaurar desplazamientos y frenos por inducción magnética como dispositivo de amortiguamiento.

Debido a que las esferas cuentan con fricción por rodadura se debe hacer énfasis en que las fuerzas restauradoras pueden ser inferiores a las que se requieren para desplazar al sistema de control. La longitud del rango donde la fuerza restauradora es inferior a la necesaria para desplazar al sistema de control se denomina 'rango de reposo' ya que el sistema de control puede detenerse en cualquier punto dentro del rango después de ser excitado sísmicamente.

Los objetivos del proyecto apuntan a usar una cantidad de imanes para rigidizar el sistema, esta cantidad siempre será impar para mantener equitativas las fuerzas en dirección x^+ y x^- , Se denominarán imanes restauradores a los imanes que restauran el sistema de control, la cantidad de imanes utilizados debe asegurar que la fuerza restauradora sea la misma en ambas direcciones de desplazamiento. Es decir, si en la base inferior se acoplan n imanes restauradores, en la base superior deben acoplarse $n+1$, el total de imanes acoplados será $2n + 1$, la figura 13 retrata los componentes del sistema de control.

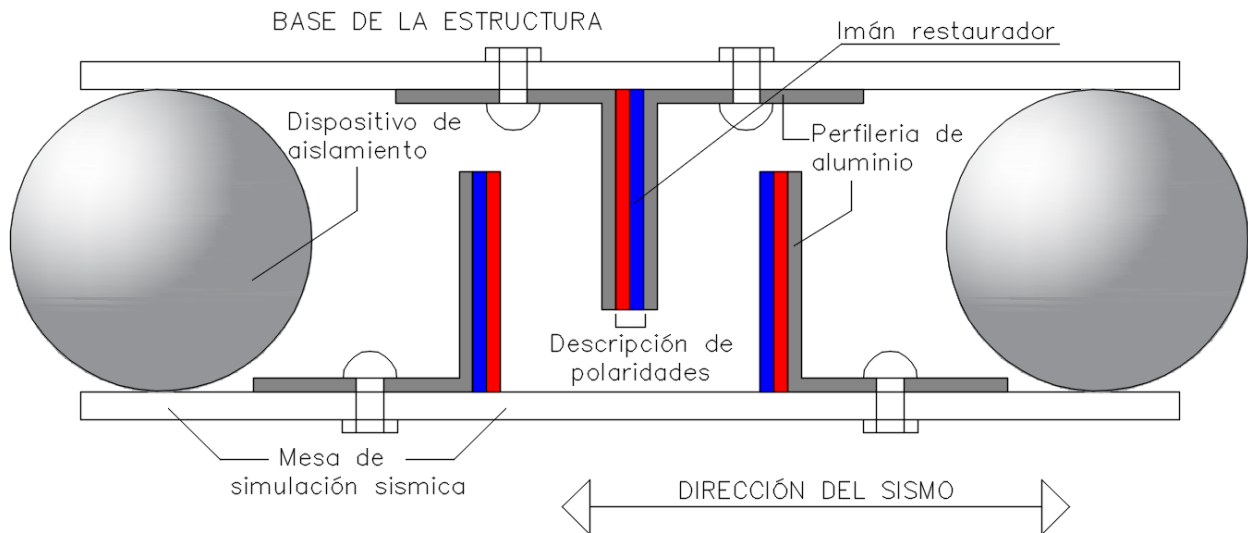


Figura 13. Diagrama básico del sistema de control.

Los imanes utilizados en el proyecto son de neodimio debido ya que tiene propiedades magnéticas superiores a los imanes cerámicos. Se eligieron imanes que geoméricamente no excedieran el espacio libre entre la base inferior y la base superior, además, que no excedieran el presupuesto personal destinado para el proyecto. Las características magnéticas de los imanes no fueron proporcionadas por el proveedor. Las medidas de los imanes son:

Imán tipo 1: 46x21x15mm

Imán tipo 2: 46x21x10mm

Durante las primeras versiones se observó que las cajas que albergan a los imanes presentaron colisiones por la falta de una componente de amortiguamiento. Esta situación es altamente nociva para las estructuras que utilicen este tipo de sistema de control ya que eventualmente podrían ser impactadas por aceleraciones sísmicas con intensidad no predecible. La colisión de las cajas podría destruir el sistema de control.

En cumplimiento de los objetivos del proyecto también se utilizaron fuerzas magnéticas para amortiguar el sistema de control. Se logró implementar el amortiguamiento por inducción magnética ubicando una caja con 3 imanes tipo 1 como se expone en la figura 14 en la base superior del sistema de control y una platina de aluminio de 2/8" en la base inferior. La figura 15 muestra un diagrama básico con el dispositivo de amortiguamiento instalado.



Figura 14. Disposición de 3 imanes tipo 1 como única fuerza magnética en amortiguar el sistema.

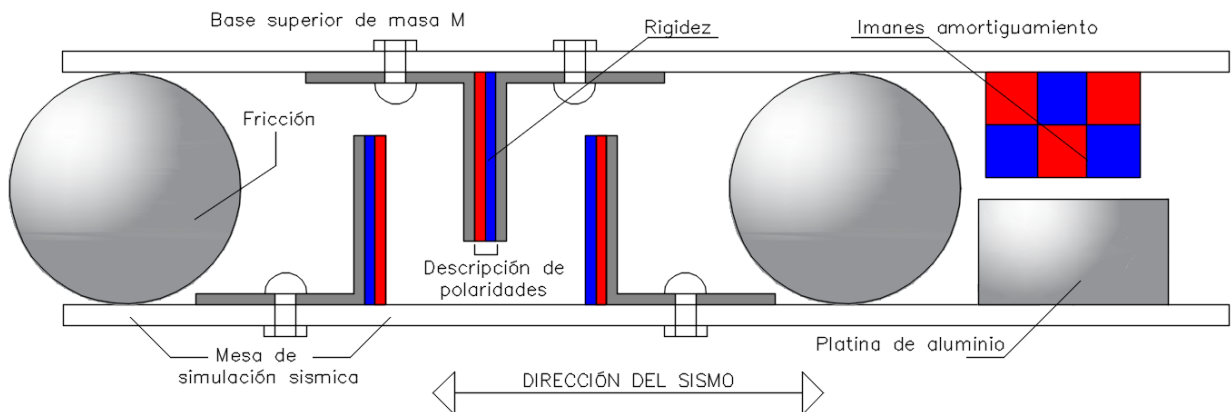


Figura 15. Diagrama básico con amortiguamiento por inducción magnética.

La figura 16 es una fotografía del sistema de control en su versión final, ya que por cuestiones que serán abordadas en el análisis de resultados se retiró la caja de 3 imanes inductores. Como se puede observar, el amortiguamiento pasa a ser función de sólo un imán inductor. Los detalles geométricos del sistema de control en su versión final se encuentran en el anexo 2.

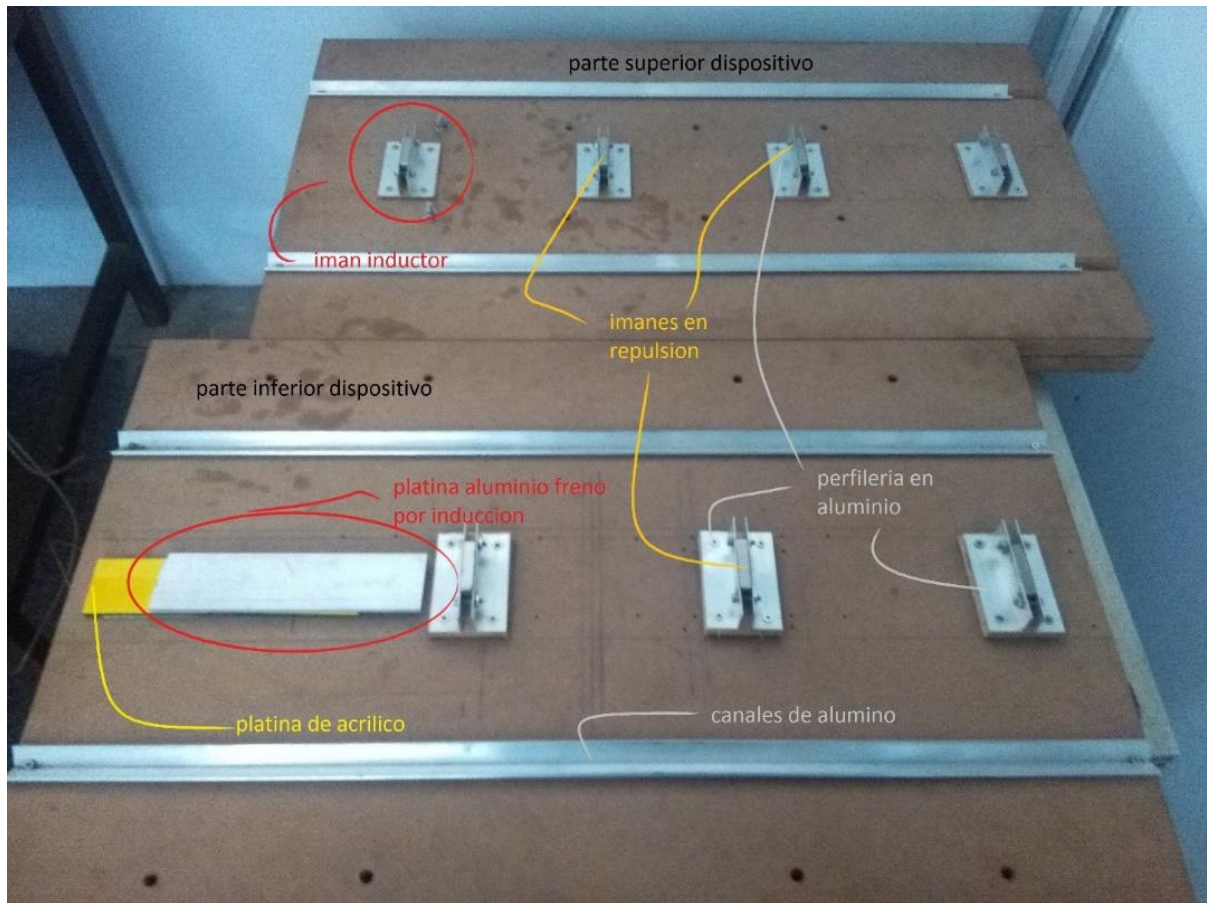


Figura 16. Fotografía del sistema de control.

En el sistema de control propuesto los imanes restauradores se encuentran a una distancia neta de 9 cm lo que resulta en aproximadamente 20 cm de libertad total de desplazamiento. La longitud del rango de reposo es de 3.9 mm absolutos para el sistema de control sin estructura acoplada. Una vez que se acopla la estructura cambia la fuerza normal de las esferas y aumenta la fuerza provocada por la fricción de rodadura, por consiguiente, la longitud del rango de reposo pasa a ser de 32mm absolutos.

3.2 Experimentación

Mantilla (2016) realizó un ensayo de barrido de frecuencias a la estructura Benchmark sin sistema de control. El barrido tuvo frecuencias desde 1 hasta 12Hz con una amplitud de 0.5mm absolutos. El barrido se realizó con la intención de tener un modelo para la estructura sin sistema de control y realizar comparativas entre las respuestas dinámicas de la estructura Benchmark con y sin sistema de control.

Los ensayos que se llevaron a cabo sobre el sistema de control sin estructura acoplada consistieron en barridos de frecuencia de amplitud constante con variación exponencial y de hasta 6Hz (figuras 25a y 36). También se excitó el sistema de control con el sismo de Armenia al 100%. Con la estructura Benchmark acoplada se realizaron ensayos de barrido de frecuencias desde 0.2 hasta 12 Hz con una amplitud de 5mm, la variación de frecuencias fue lineal.

La recolección de datos se realizó por medio de sensores acelerómetros paralelos a la dirección del sismo excitante que envían datos en magnitudes de voltaje por señal analógica a un conversor de señal analógica a digital, donde se transportan los datos al ordenador que esté adquiriendo. La figura 17 muestra la ubicación de los sensores con la estructura acoplada.

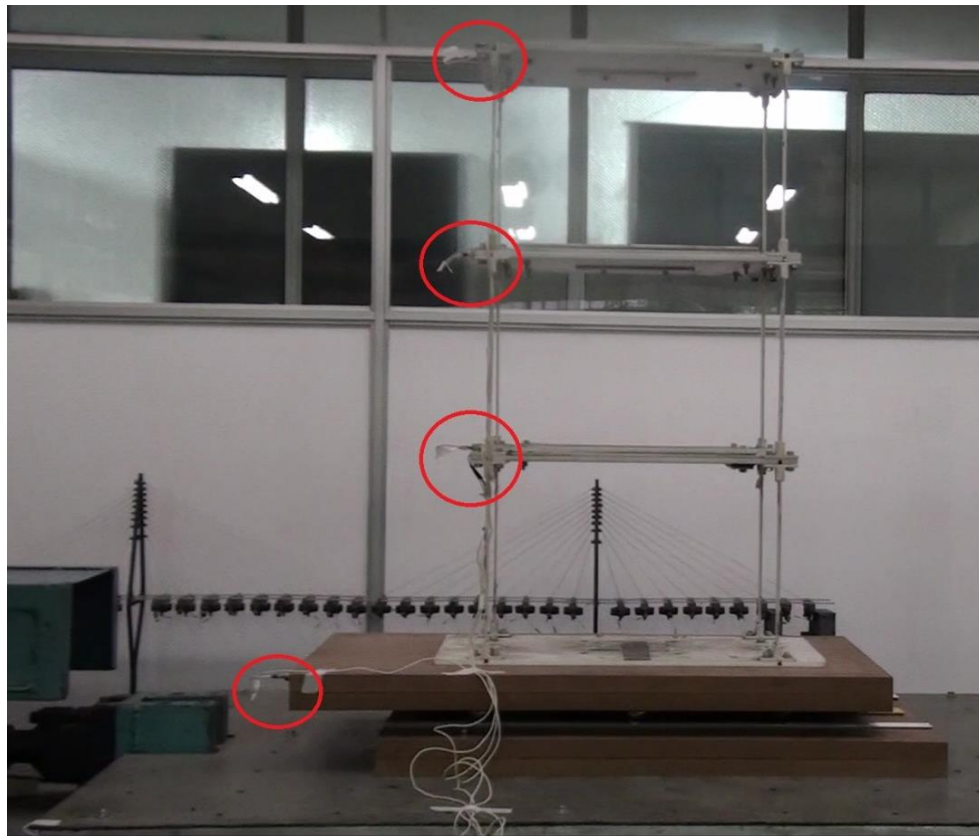


Figura 17. Fotografía del sistema de control con la estructura Benchmark acoplada y sensores fijados.

Se advierte que toda la información consignada en el capítulo de resultados es la conversión directa de voltaje (V) a aceleraciones (m/seg²) adquiridos por los acelerómetros, es decir, todos los resultados se muestran en aceleraciones absolutas. Se utiliza el método de la *transformada rápida de Fourier fft* de Matlab para llevar las señales recogidas al dominio de frecuencias. Esto debido a que en algunos ensayos las aceleraciones del sistema de control fueron tan pequeñas que hacer la conversión a aceleraciones relativas es improductivo.

Todos los porcentajes de correspondencia se calcularon mediante la ecuación (9)

$$Feval(\bar{y}, y) = 100 \left(1 - \frac{\|\bar{y} - y\|}{\|\bar{y} - mean(\bar{y})\|} \right) \quad (9)$$

Donde:

\bar{y} : Señal discreta de referencia

y : Señal discreta evaluada

Feval: valor de correspondencia entre dos señales

Se desarrolló un ensayo de rigidez lateral que consistió en adicionar una carga lateral *M2* al sistema de control con y sin la estructura Benchmark acoplada como se muestra en la figura 18, los resultados del ensayo trazaron los puntos de la figura 19.

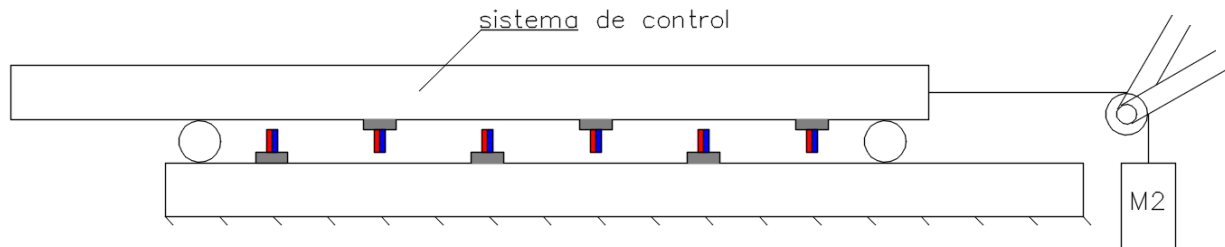


Figura 18. diagrama del ensayo de carga-desplazamiento lateral.

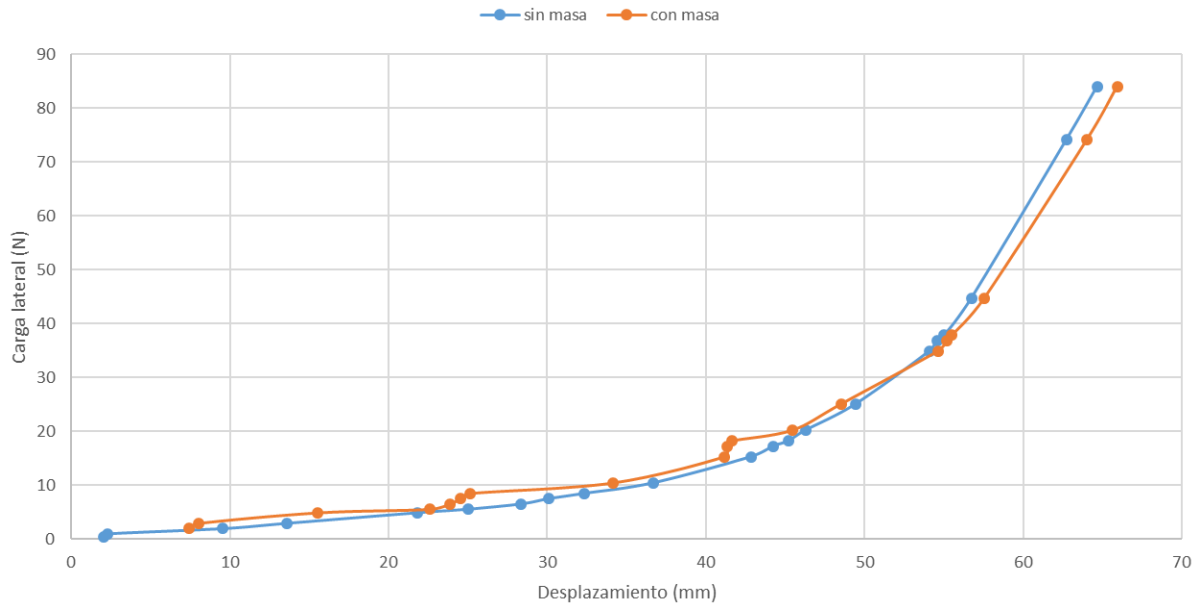


Figura 19. Resultados del ensayo de carga-desplazamiento lateral.

Una vez obtenidos los valores del ensayo se decidió que se utilizarían únicamente los datos del ensayo sin estructura Benchmark acoplada, ya que, cómo se puede observar, estos forman una parábola con cambios menos bruscos entre puntos en comparación al ensayo con estructura acoplada. Conociendo que la fuerza que un imán ejerce sobre otro disminuye con el cuadrado de la distancia se construyó una función con la forma de la ecuación (10):

$$F = \frac{100000}{a u^2 + b u + c} + \frac{100000}{-a u^2 + b u - c} \quad (10)$$

Donde:

u : desplazamiento relativo (mm).

F : fuerza de restauración (N).

a, b, c : coeficientes constantes.

Cabe aclarar que la función cuenta con dos fraccionarios para separar la fuerza magnética que ejercen los imanes en $u+$ y $u-$, los fraccionarios se asemejan en forma a la ecuación (1), la diferencia radica en que (1) calcula la fuerza entre polos magnéticos en el rango $(0, \infty)$, siendo 0 la distancia cuando los polos no pueden acercarse más físicamente, en cambio los imanes del dispositivo estudiado tienen una coordenada cero ubicada en la mitad del espacio libre entre imanes restauradores. Por medio de una función de optimización se encontraron los coeficientes a , b y c que mejor se ajustaron a los datos. En la figura 20 se muestran los puntos obtenidos del ensayo de desplazamiento-carga lateral y la función con los coeficientes que ajustaron.

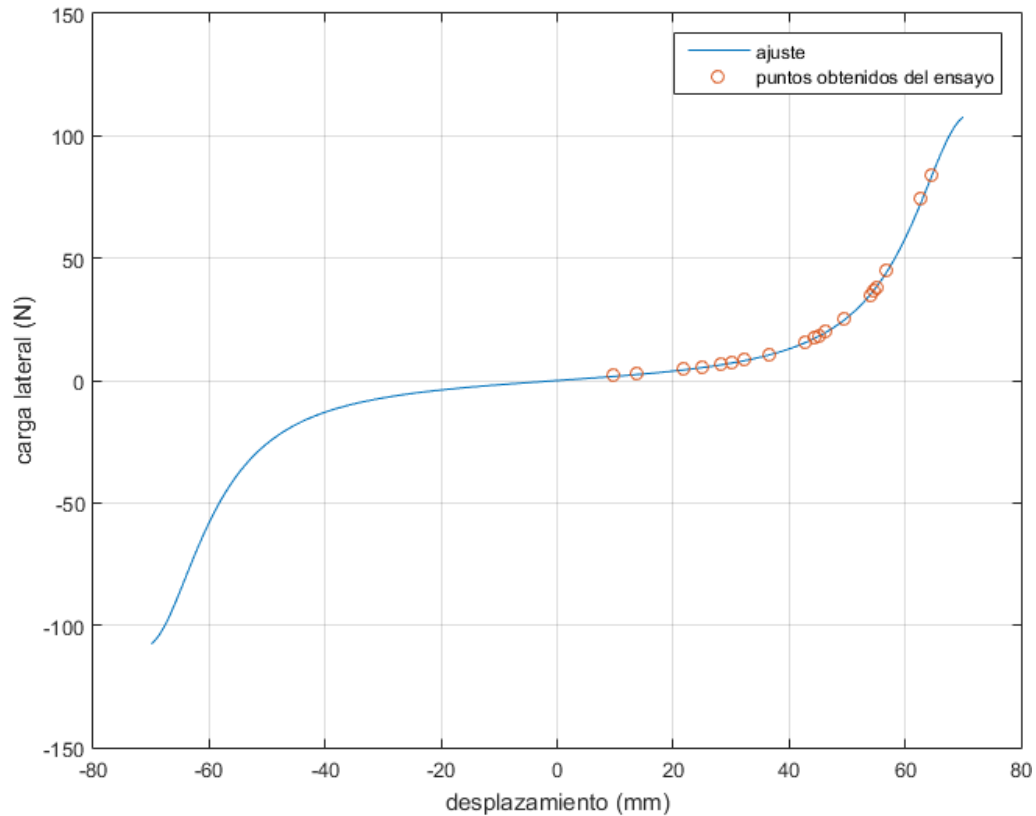


Figura 20. Ajuste de los coeficientes a, b y c en la ecuación (9) para ajustarse a los datos obtenidos del ensayo de carga-desplazamiento lateral. Coeficientes de ajuste: $a= 6.3245$, $b= -899.64$, $c= 3.2907 \times 10^{-4}$.

Una vez obtenida la función de rigidez se procede a encontrar la distancia a la que los imanes restauradores rigidizan el sistema de control y reducen el rango de reposo a un valor relativamente aceptable de 5mm con la estructura acoplada. La masa del sistema de control es de 17.3 kg y la fuerza de fricción de rodadura provocada por las esferas provoca un rango de reposo de 3.9mm.

$$F_s \left(\frac{32mm}{2} \right) = 2.92 \text{ N}$$

Se obtiene que la fuerza necesaria para desplazar al sistema de control tipo aislamiento con la estructura acoplada es de 2.92N. Se programa un Script que digitalmente desplace los imanes restauradores para que el valor de 2.92N sea alcanzado en $\pm 2.5mm$, es decir, 5mm absolutos.

El script arroja que los imanes restauradores deben acercarse 36mm, es decir, la distancia neta entre imanes debe ser de 54mm y la libertad total de desplazamiento se disminuye a aproximadamente 13cm.

3.3 Modelo del sistema de control

Se procedió a realizar un modelo tipo 'función de transferencia' a las respuestas absolutas del sistema de control sin la caja de imanes amortiguadores. Se utilizó el Toolbox 'ident' de Matlab y el subproducto 'nonlinear models'. Como dato adicional se hace énfasis en que las funciones de transferencia lineales no alcanzaban valores significativos de correspondencia en ningún subproducto debido a que el sistema de control contiene plenamente fuerzas no lineales, por lo tanto, las respuestas de la estructura Benchmark son también no lineales.

La metodología del modelamiento consistió en importar las señales de entrada (sismo) y salida (cada grado de libertad) al toolbox y variar la cantidad de 'polos' y 'zeros' del sistema de forma aleatoria para que la función de transferencia construya las frecuencias armónicas que caracterizan al sistema de control. Una vez que se halló una función de transferencia con un porcentaje de correspondencia superior al 80% en el tiempo, se pasa a calcular otra función de transferencia para los residuos de la primera función de transferencia. En teoría se podrían crear funciones de transferencia de los residuos hasta llegar a una igualdad del 100%, pero la cantidad de funciones de transferencia podría ser inmenso.

En todos los grados de libertad, el máximo porcentaje de igualdad de la segunda función de transferencia no pasó de 8%. La figura 21 muestra en paralelo las respuestas del sistema de control real y el modelo bajo la misma carga sísmica: barrido de frecuencias lineal de 0.2 a 12Hz con amplitud de 5mm absolutos. Las figuras 1 a 3 del anexo 3 exponen el ajuste de los grados de libertad de la estructura Benchmark. La tabla 2 muestra el porcentaje de igualdad en tiempo y en dominio de frecuencias entre el modelo y el ensayo para los diferentes grados de libertad.

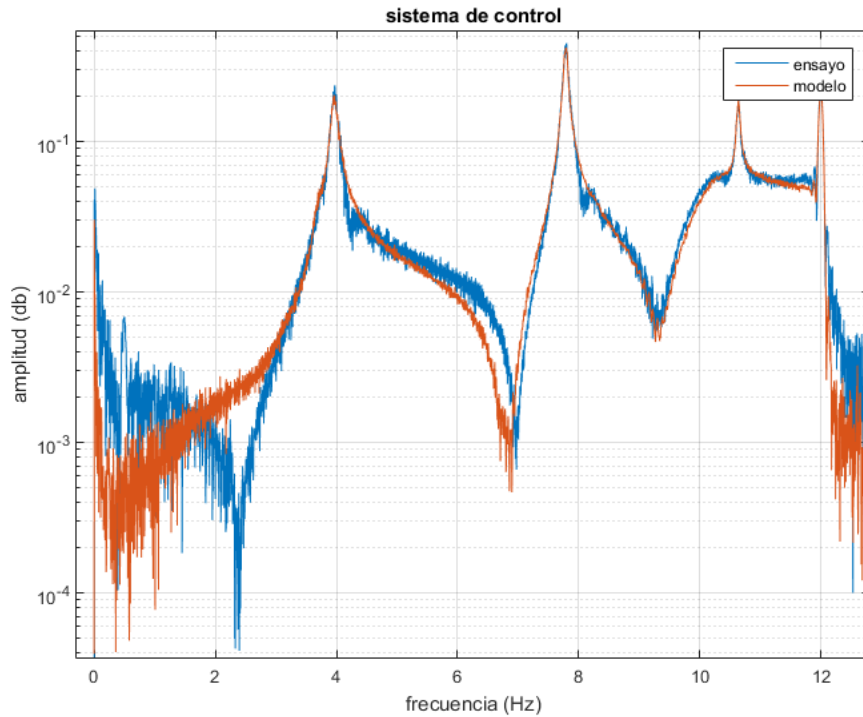


Figura 21. Ajuste en dominio de frecuencias de la respuesta del sistema de control con estructura acoplada bajo excitación en la base tipo barrido.

Tabla 2. porcentajes de correspondencia entre la respuesta de los modelos de cada piso y las aceleraciones del ensayo tipo barrido de frecuencias

Grado de libertad	% tiempo	% dominio frecuencias
Sistema de control	80.2	86.2
Piso 1	89.2	92.6
Piso 2	89	92.1
Piso 3	84.2	88.6

Los modelos de la estructura con el sistema de control acoplado fueron construidos con la estructura Hammerstein-wiener que se ejecuta como se muestra en la figura 22. La estructura contempla dos bloques no lineales y un bloque lineal intermedio. El software usado para calcular las funciones de transferencia fue Matlab, el cual no muestra los parámetros internos de la estructura Hammerstein-wiener, por lo tanto, se anexan digitalmente los objetos necesarios para modelar la estructura Benchmark con el sistema de control no lineal acoplado.

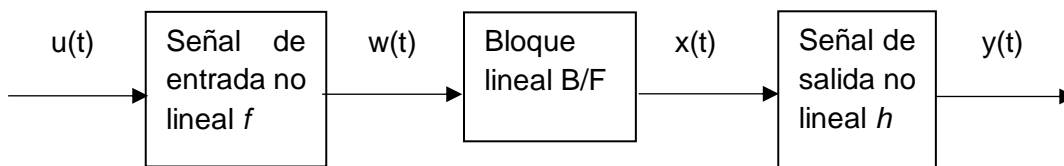


Figura 22. Estructura de los modelos tipo función de transferencia tipo Hammerstein - wiener

Capítulo 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Resultados experimentales del sistema de control

Los resultados en el dominio del tiempo para el ensayo de barrido a la estructura Benchmark sin sistema de control se presentan en la figura 23 para cada piso. La figura 24 muestra los resultados trasladados al dominio de frecuencias para el piso 1 y su modelo equivalente. La misma comparación se puede ver en las figuras 4 y 5 del anexo 3 para los pisos 2 y 3 respectivamente. Los porcentajes de correspondencia del modelo de la estructura Benchmark sin sistema de control se presentan en la tabla 3.

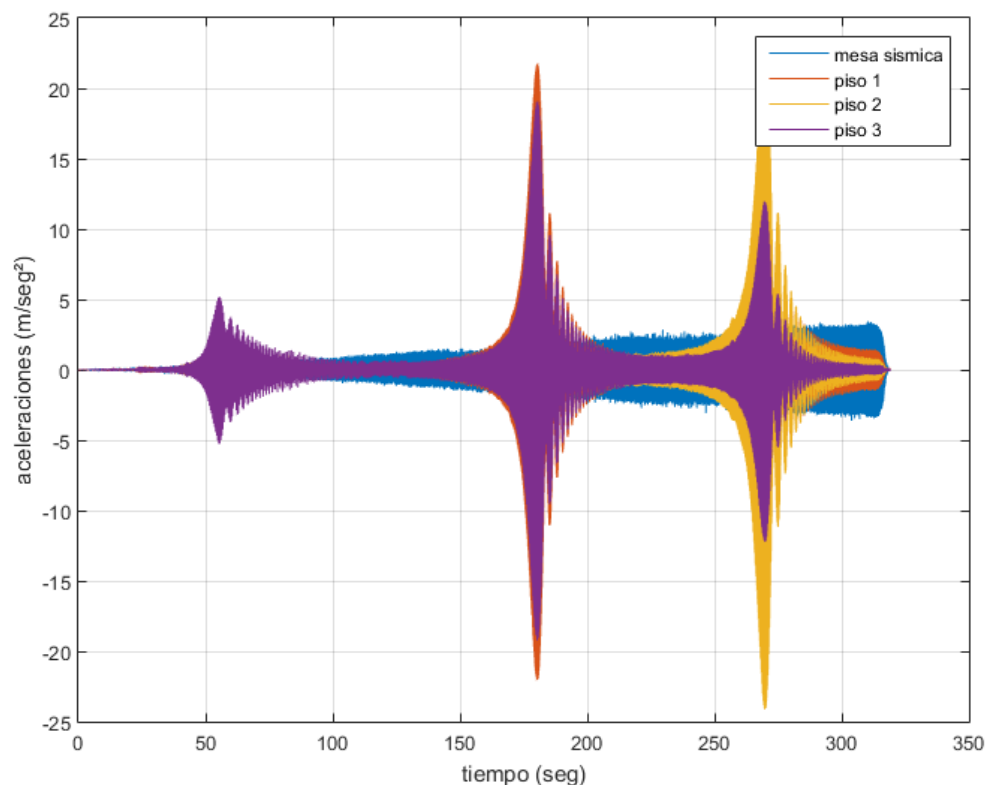


Figura 23. ensayo de barrido para la estructura Benchmark sin sistema de control.

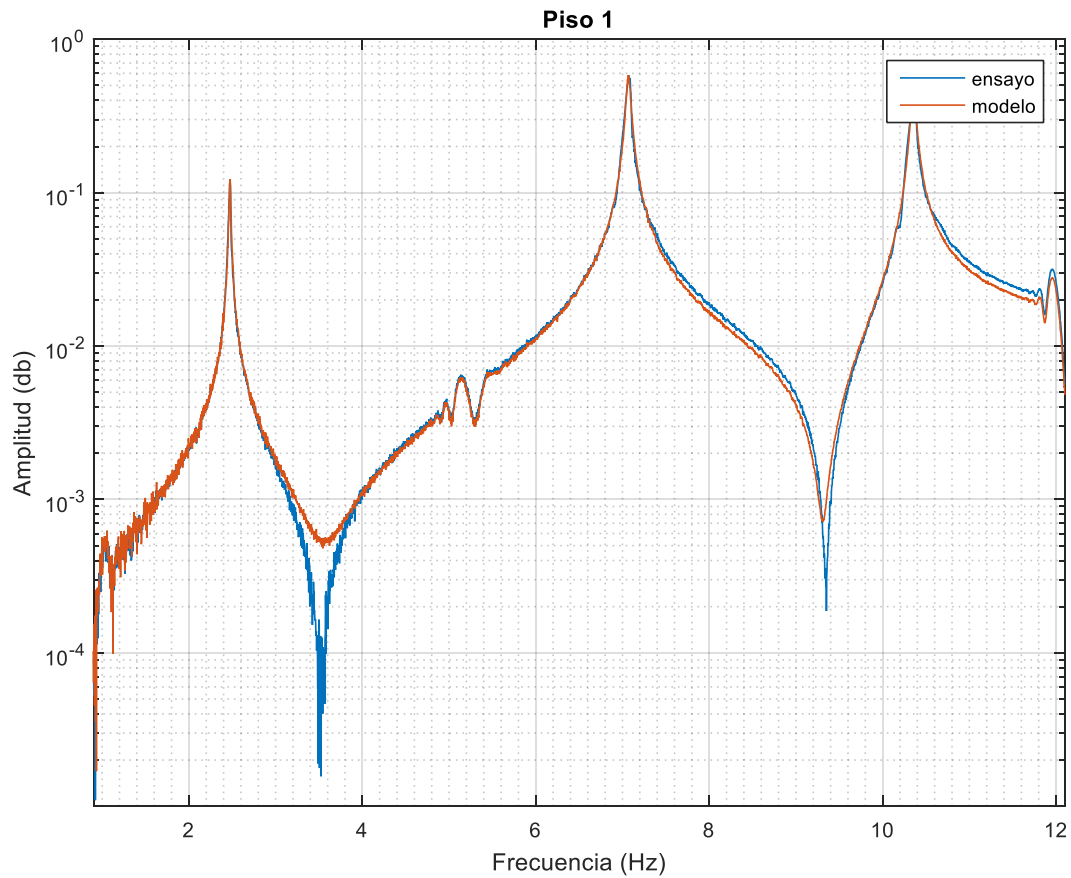


Figura 24. Modelo para el piso 1 sin sistema de control.

Tabla 3. Porcentajes de correspondencia modelo estructura Benchmark.

Piso	Dominio del tiempo (%)	Dominio de frecuencias (%)
1	85.14	88.18
2	84.58	87.7
3	83.25	86.57

La función de transferencia para el piso 1 de la estructura Benchmark se representa por medio de la ecuación 11. Las funciones de transferencia de los pisos 2 y 3 se describen en las ecuaciones 1 y 2 del anexo 3.

$$H(t) = \frac{Y1 s^4 + Y2 s^3 + Y3 s^2 + Y4 s + Y5}{X1 s^6 + X2 s^5 + X3 s^4 + X4 s^3 + X5 s^2 + X6 s + X7} \quad (11)$$

donde:

Y1=1195.1
Y2=-4299.7
Y3=4691124.6
Y4=-12648618.7
Y5=2047183478.7

X1= 1
X2=0.792126513670498
X3=6448.3
X4=2907.1
X5=9854047.9
X6=1420724.8
X7=2018977710.4

El sistema de control implementa tres imanes tipo 1 que fueron ubicados cómo se muestra en la figura 14 para que sólo actúe éste grupo como generadores de amortiguamiento. El circuito cerrado inducido consiste en una sola platina de espesor 2/8". Se realizó un ensayo de barrido desde 0.2 hasta 5hz sin la estructura, con aumento de frecuencias exponencial y una amplitud de 10mm, En la figura 25a se muestra el ensayo registrado en el tiempo.

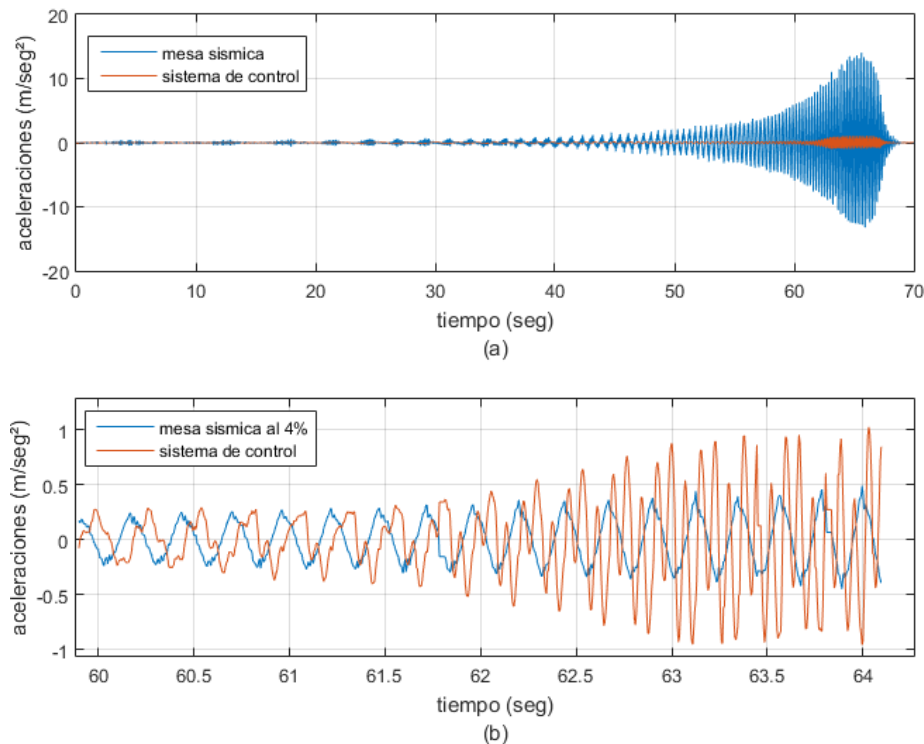


Figura 25.(a) ensayo de barrido al sistema de control sin estructura Benchmark. (b) Acercamiento a la figura 33 en el rango de 60 a 64 seg, las aceleraciones de la mesa sísmica están escaladas al 4%.

La figura 25b muestra un acercamiento a la respuesta en el tiempo en el tramo de 60 a 64 segundos. Para facilitar la lectura de la señal del sistema de control se redujo la aceleración de la mesa sísmica a un 4% de su valor. En este ensayo surgió un fenómeno que se denominó 'armónicos de respuesta'. Este fenómeno se caracteriza por crear señales que poseen frecuencias múltiplos de la señal excitante. Es decir, si la señal excitante es de 5Hz, el fenómeno

causa que el sistema de control responda con una señal de 5, 10 y 15Hz (Bingham). En el gráfico se puede observar que a partir del segundo 61 del ensayo empieza a incrementarse el fenómeno de 'armónicos de respuesta'. Para obtener un análisis más detallado se traslada el ensayo a dominio de frecuencias en la figura 26.

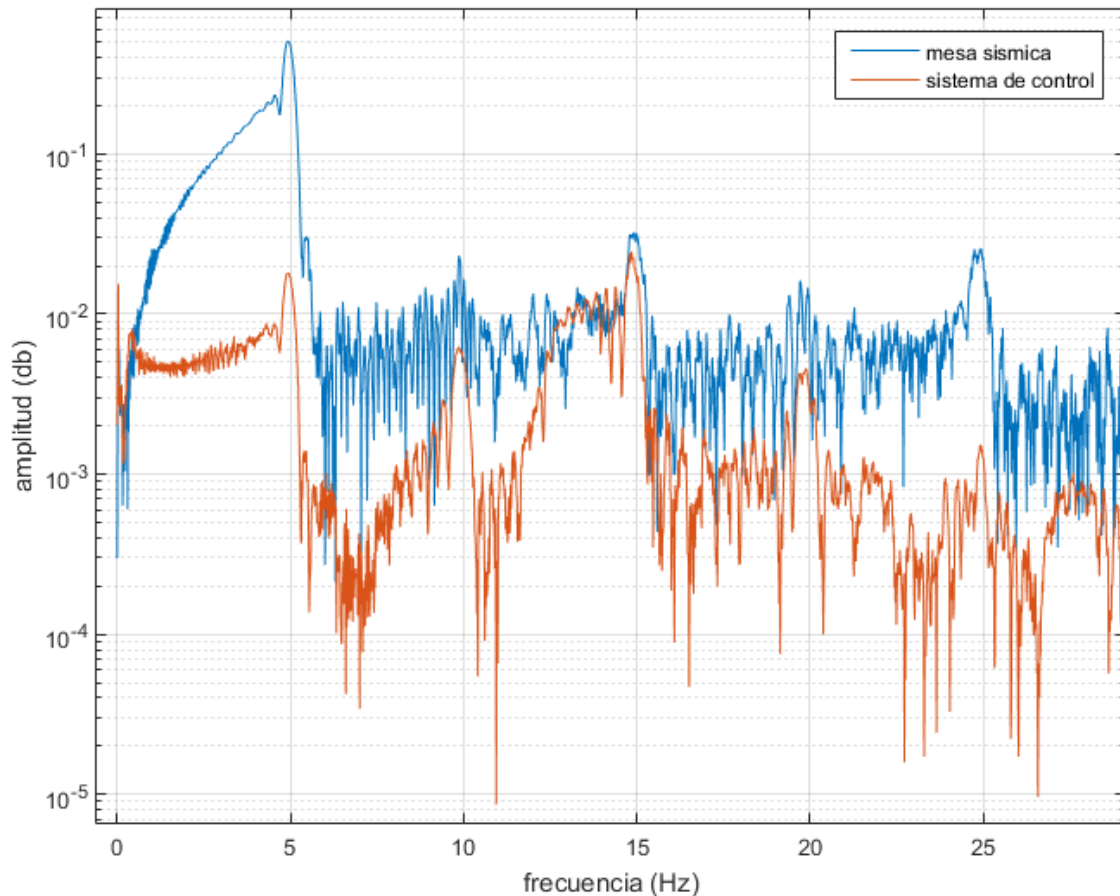


Figura 26. Ensayo de barrido al sistema de control trasladado a dominio de frecuencias.

En el gráfico se puede ver que la respuesta del sistema de control cuenta con amplitudes por fuera de la frecuencia máxima ensayada en 10, 15 y 20 Hz. Como la respuesta del sistema de control es tan baja, resulta mejor realizar un análisis por espectrograma, el cual se muestra en la figura 27. Como se observa, el sistema de control no posee una frecuencia natural (F_n) representativa y en altas frecuencias de excitación aparece el fenómeno de armónicos de respuesta.

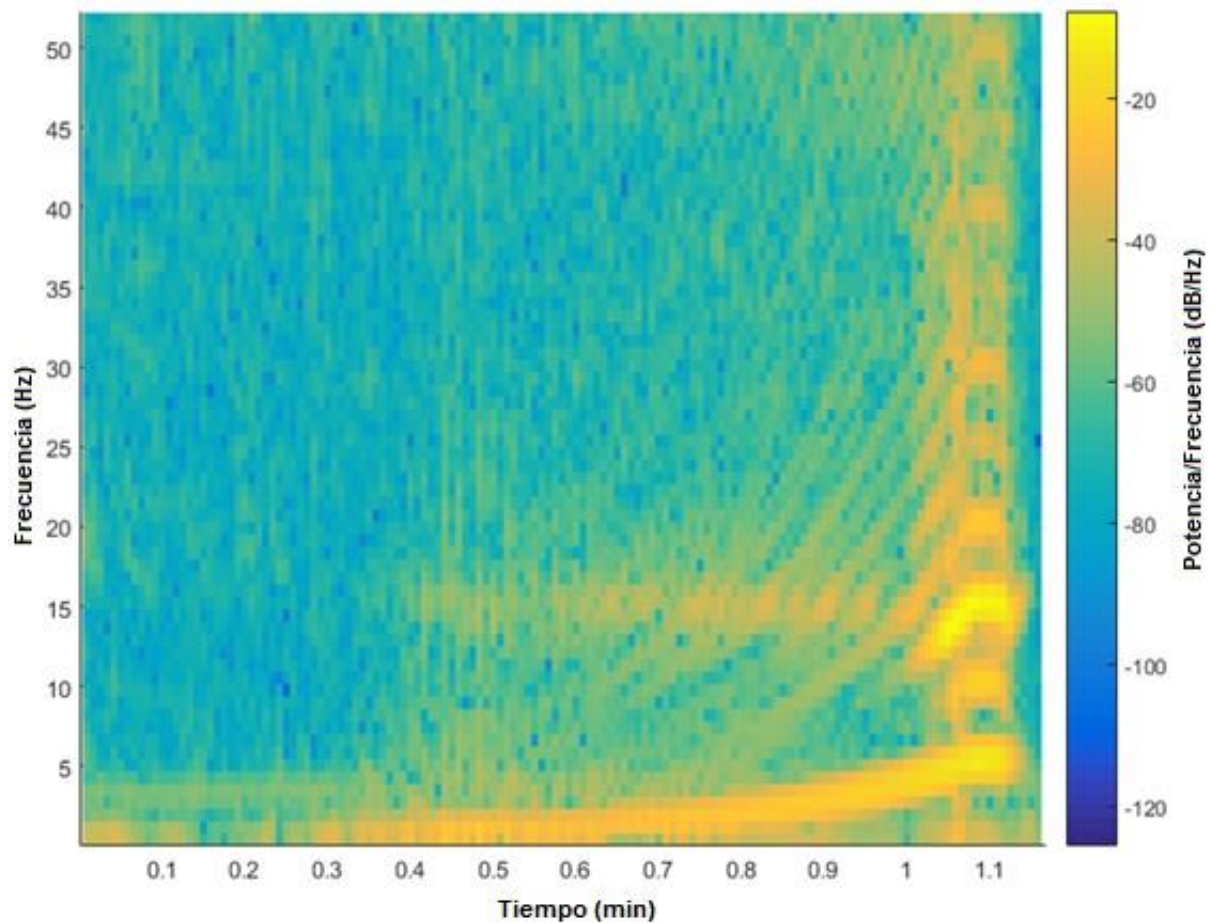


Figura 27. espectrograma de la respuesta del sistema de control bajo carga excitante de barrido de frecuencias.

Se ensaya el sistema de control con la estructura benchmark de 3 grados de libertad acoplada. Se ensayó un barrido de frecuencias con amplitud absoluta de 5mm, de 0.2 a 12 Hz. En la figura 28 se muestra la respuesta del sistema de control y las cargas excitantes de la mesa sísmica: Nótese la aparición de altas aceleraciones en forma de campana a ciertas frecuencias al incorporar un sistema dinámico de tres grados de libertad, como en anteriores casos se traslada el registro al dominio de frecuencias en la figura 29:

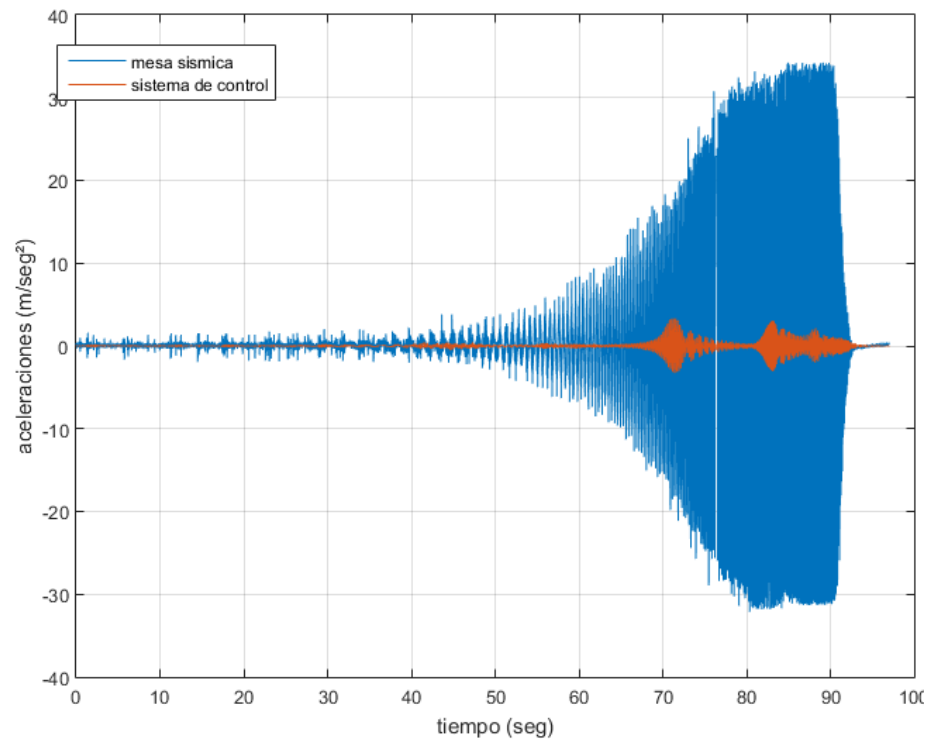


Figura 28. Respuesta del sistema de control con la estructura Benchmark acoplada bajo carga excitante de barrido.

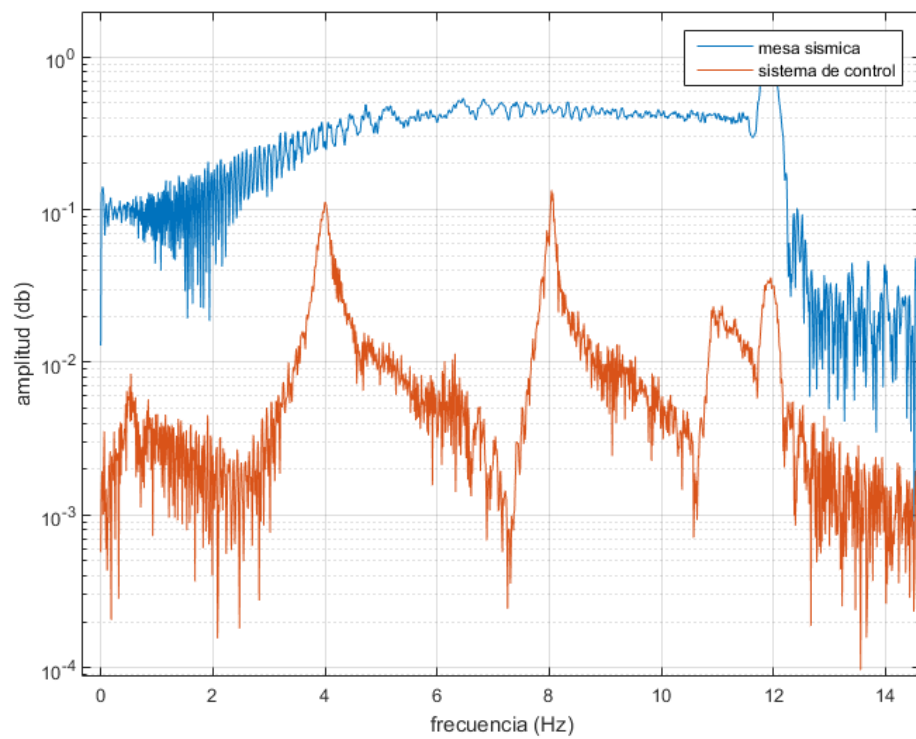


Figura 29. Dominio de frecuencias de la respuesta del sistema de control bajo excitación en la base tipo barrido. y con la estructura Benchmark acoplada.

La figura 28 también muestra la efectividad del dispositivo como aislador sísmico, específicamente de este ensayo se obtuvieron dos observaciones significativas:

1. Con el modelo obtenido al comienzo de esta sección se puede generar un registro en el tiempo excitando el modelo con el vector de aceleraciones del ensayo. La estructura Benchmark sin sistema de control acoplada cuenta con las siguientes frecuencias naturales: 2.47, 7.96 y 10.33 Hz, las cuales, al acoplar el sistema de control aumentaron a 4, 8.04 y 10.9 Hz. Además, hubo otro pico de respuesta a 0.54Hz, que eventualmente podría tomarse como la frecuencia natural del sistema de control. La figura 30 muestra las respuestas del modelo del piso 1 de la estructura Benchmark sin sistema de control al mismo barrido ensayado. Las figuras 6 y 7 del anexo 3 muestran las reacciones del piso 2 y3. La figura 31 traslada esos resultados al dominio de frecuencias.

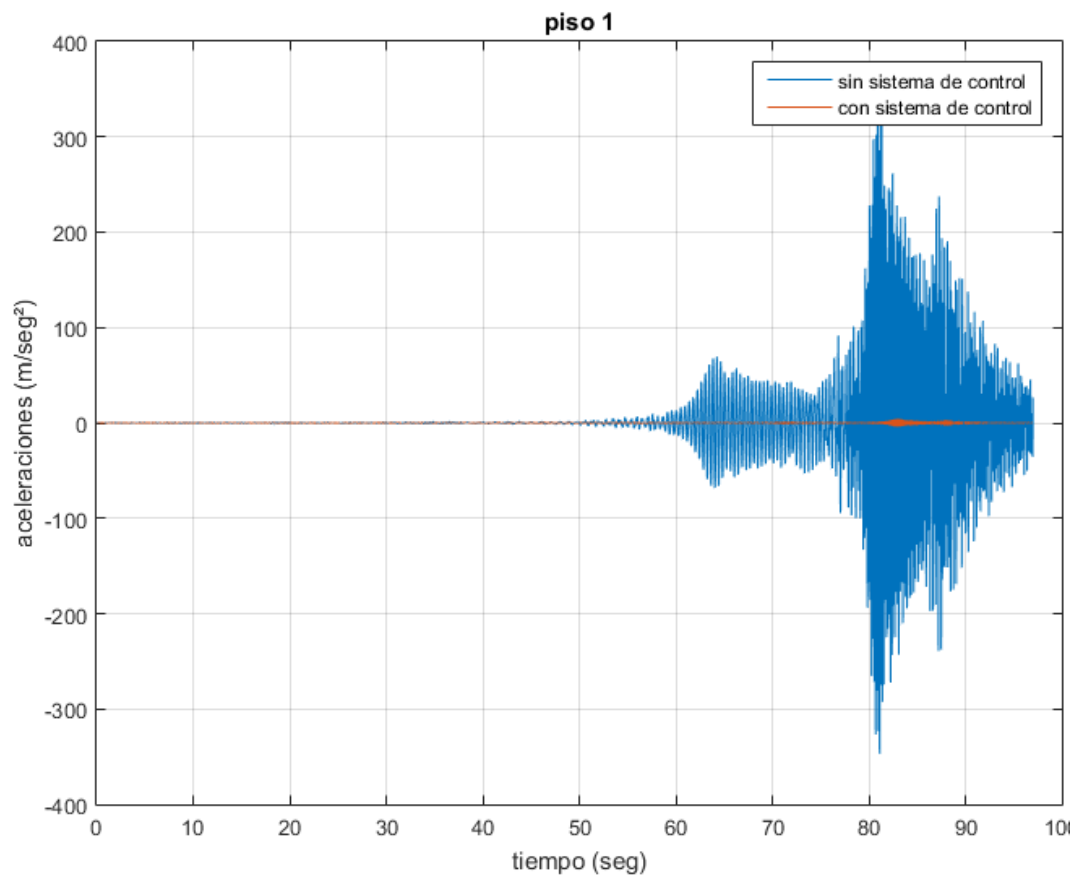


Figura 30. Comparación en el tiempo respuestas modelo sin sistema de control y ensayo con sistema de control, piso 1.

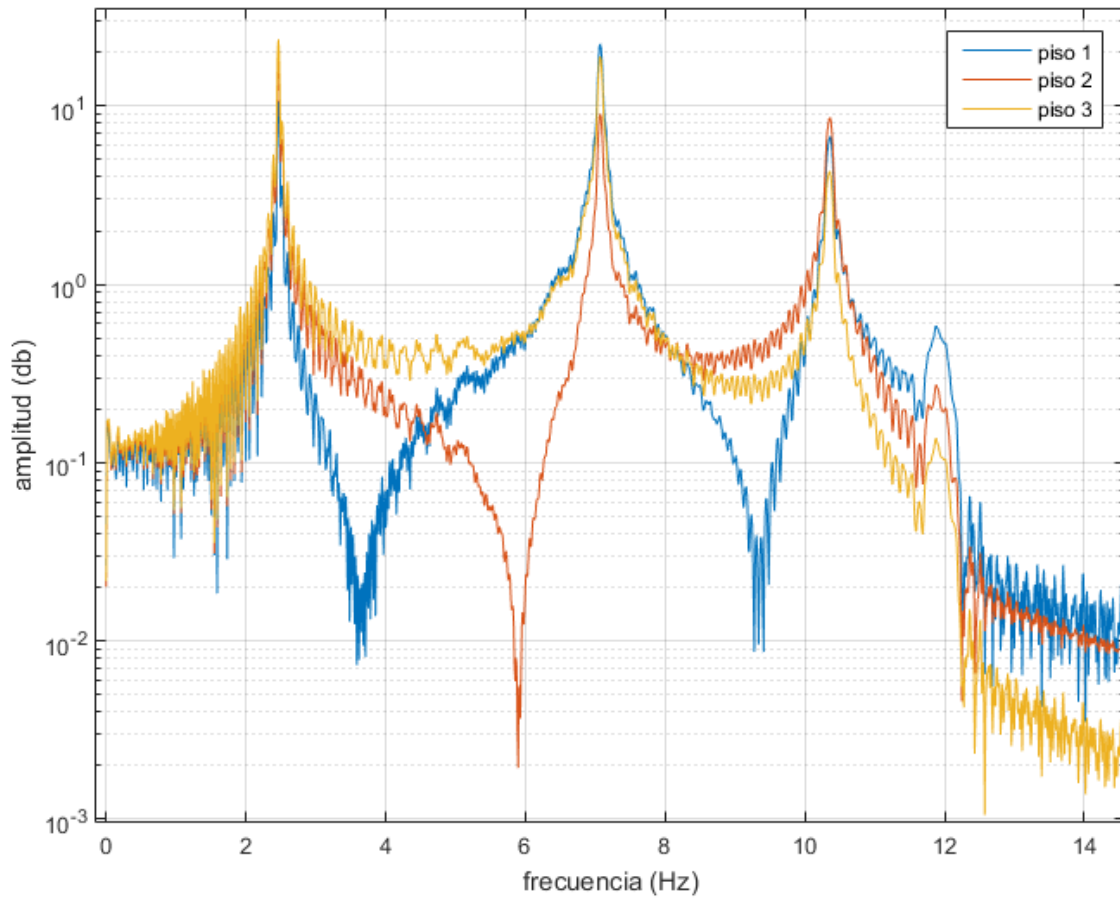


Figura 31. Dominio de frecuencias de la respuesta producida por el modelo de la estructura sin sistema de control bajo las mismas cargas sísmicas tipo barrido que se ensayaron con el sistema de control.

2. En relación con la observación anterior se destaca la relativamente baja transmisibilidad suelo-estructura con una reducción de 98.83% en el piso 1, 98.49% en el piso 2 y de 98.93% en el piso 3 de las aceleraciones máximas absolutas.

Las aceleraciones de respuesta de los tres niveles de la estructura Benchmark con sistema de control se muestran individualmente en la figura 32. Además, los registros se trasladan al dominio de frecuencias en la figura 33.

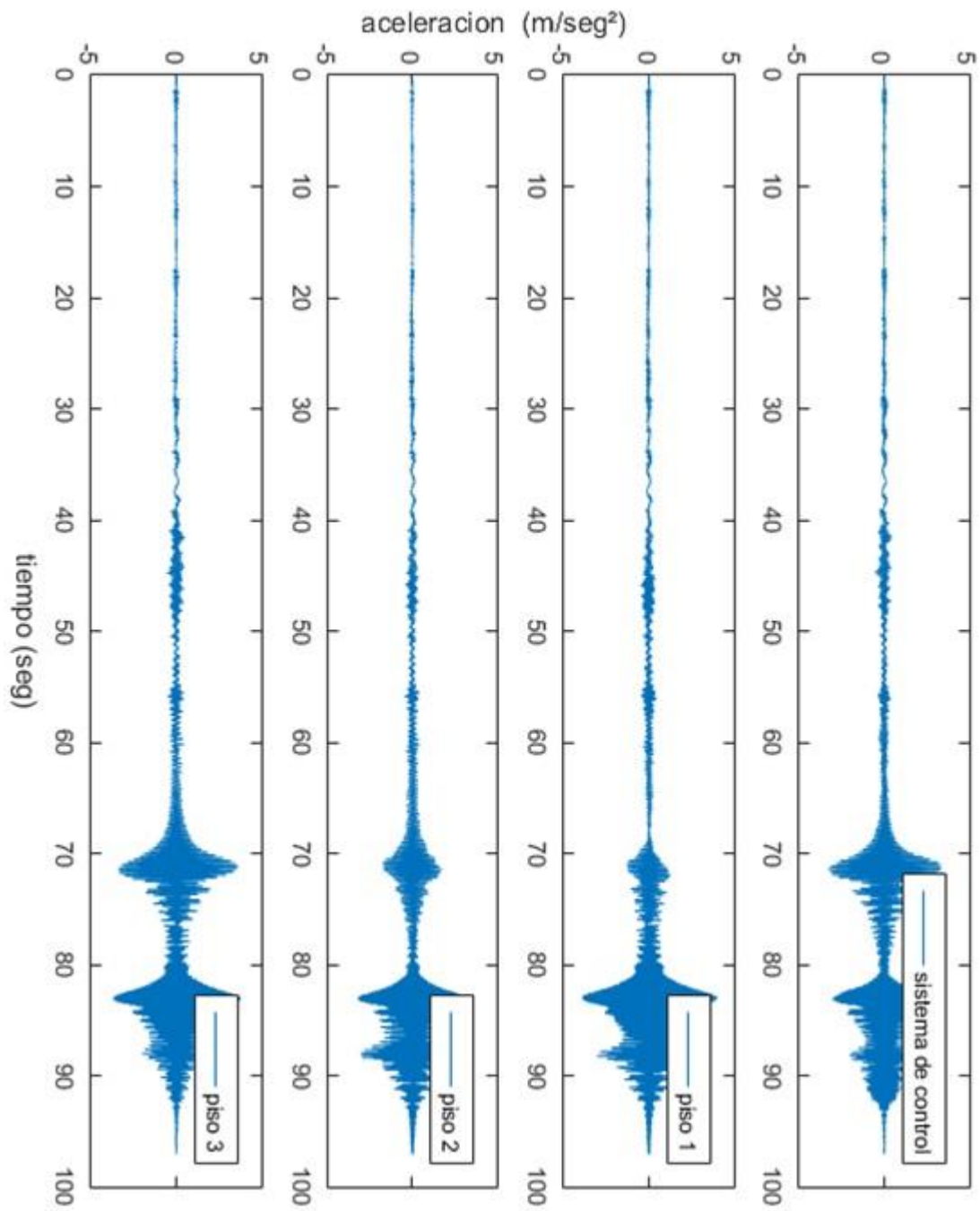


Figura 32. Respuesta de los 3 grados de libertad de la estructura Benchmark y el sistema de control bajo carga sísmica tipo barrido con amplitud absoluta de 5mm y frecuencia oscilatoria desde 0.2 hasta 12 Hz.

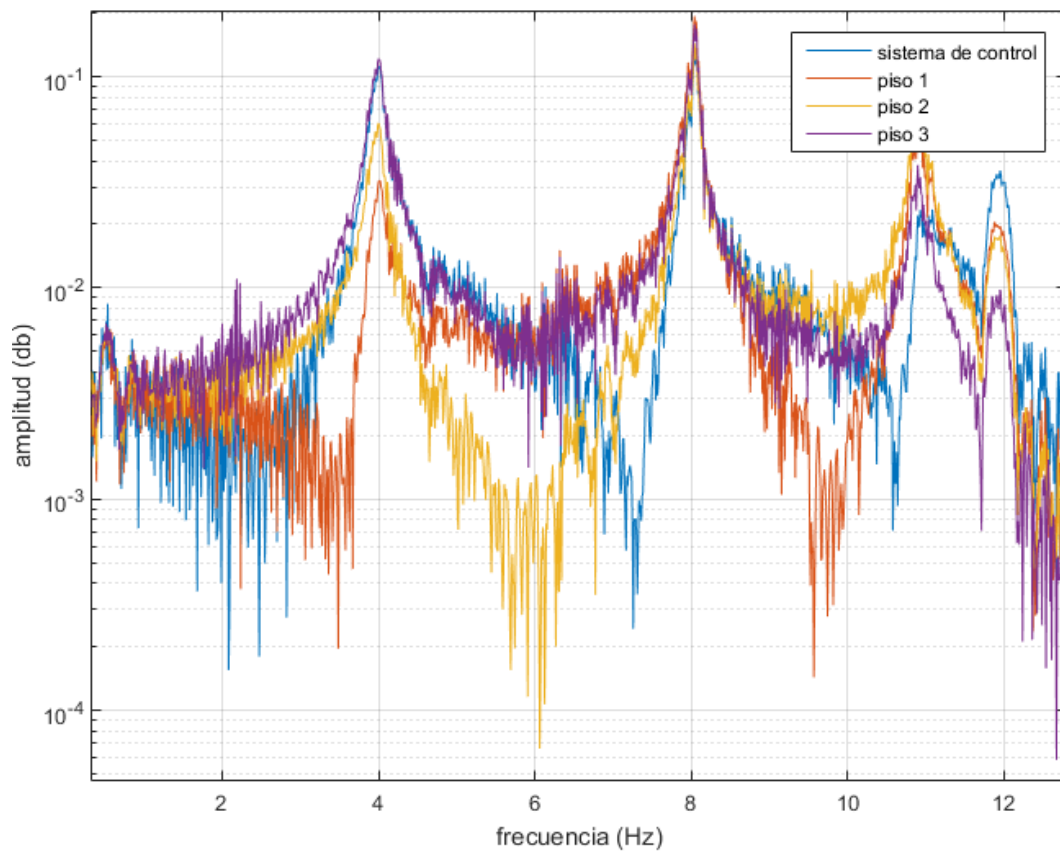


Figura 33. Registros de la figura 32 trasladados a dominio de frecuencias.

El sismo de Armenia, con una aceleración máxima de 19.69 m/seg^2 provocó que el dispositivo alcanzara una aceleración de 0.85 m/seg^2 . La carga sísmica termina y el dispositivo se amortigua para regresar a una ubicación no específica dentro del rango de reposo. En la figura 34 se muestra el sismo excitante y la respuesta del sistema de control. Las figuras 8 a 10 del anexo 3 muestran las respuestas individuales de cada piso.

Se formula la hipótesis de que la fuerza de fricción es tan grande (debido al gran peso de la estructura), que la mayor parte de la energía es ahí absorbida, esto tiene implicaciones positivas y negativas: positivas porque las aceleraciones fueron reducidas casi en su totalidad; negativas porque el sistema de control tiene un rango de reposo de 32mm, lo cual en escala real es inaceptable.

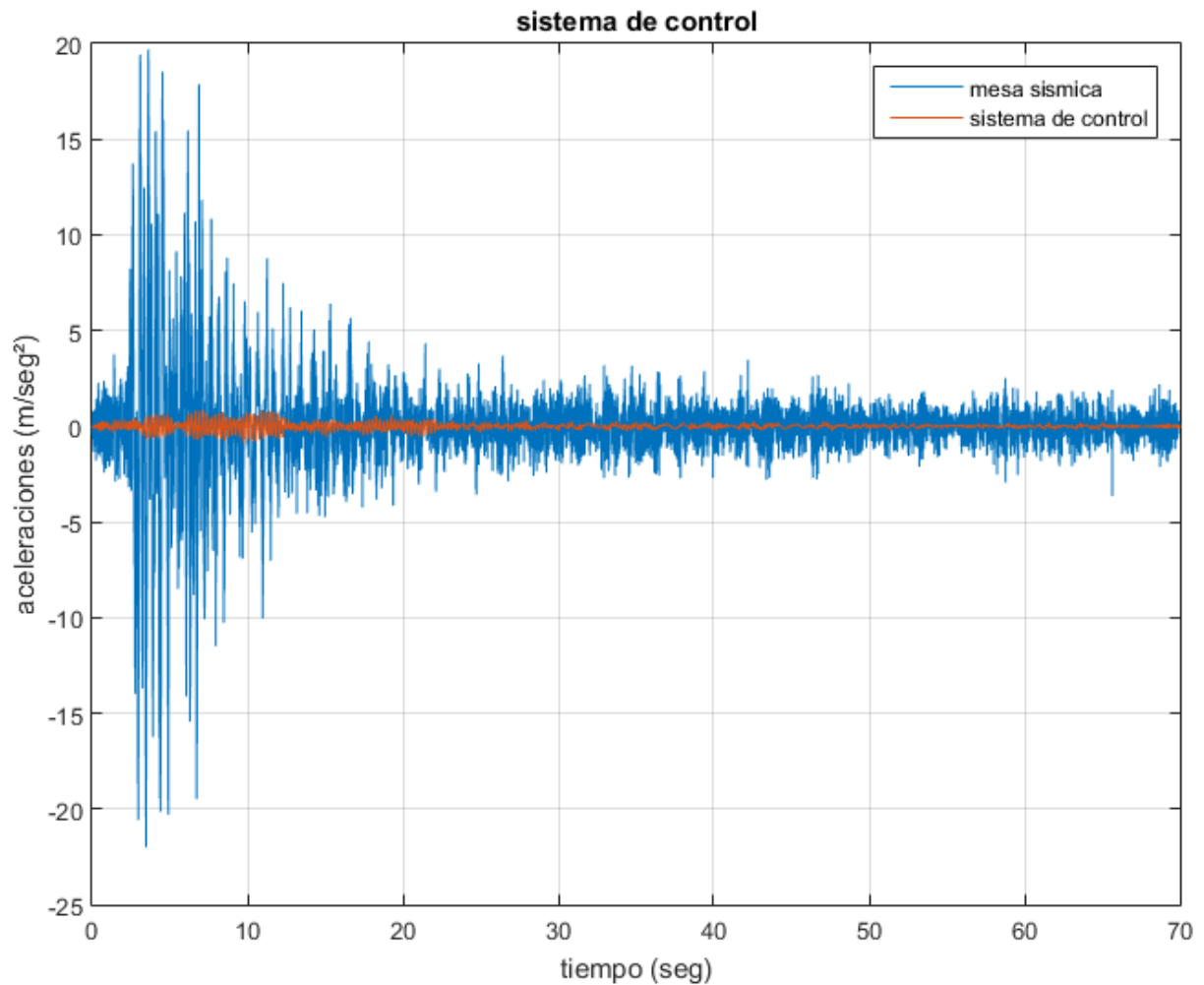


Figura 34. Respuesta del sistema de control con estructura Benchmark acoplada bajo el sismo de Armenia.

Como revisión se procedió a ensayar el sismo de Armenia al sistema de control sin estructura Benchmark acoplada. En la figura 35 se muestran los datos recogidos para el sistema de control con el sismo de Armenia como señal excitante. Las cajas de los imanes no colisionaron y el sistema de control regresó a su rango de reposo.

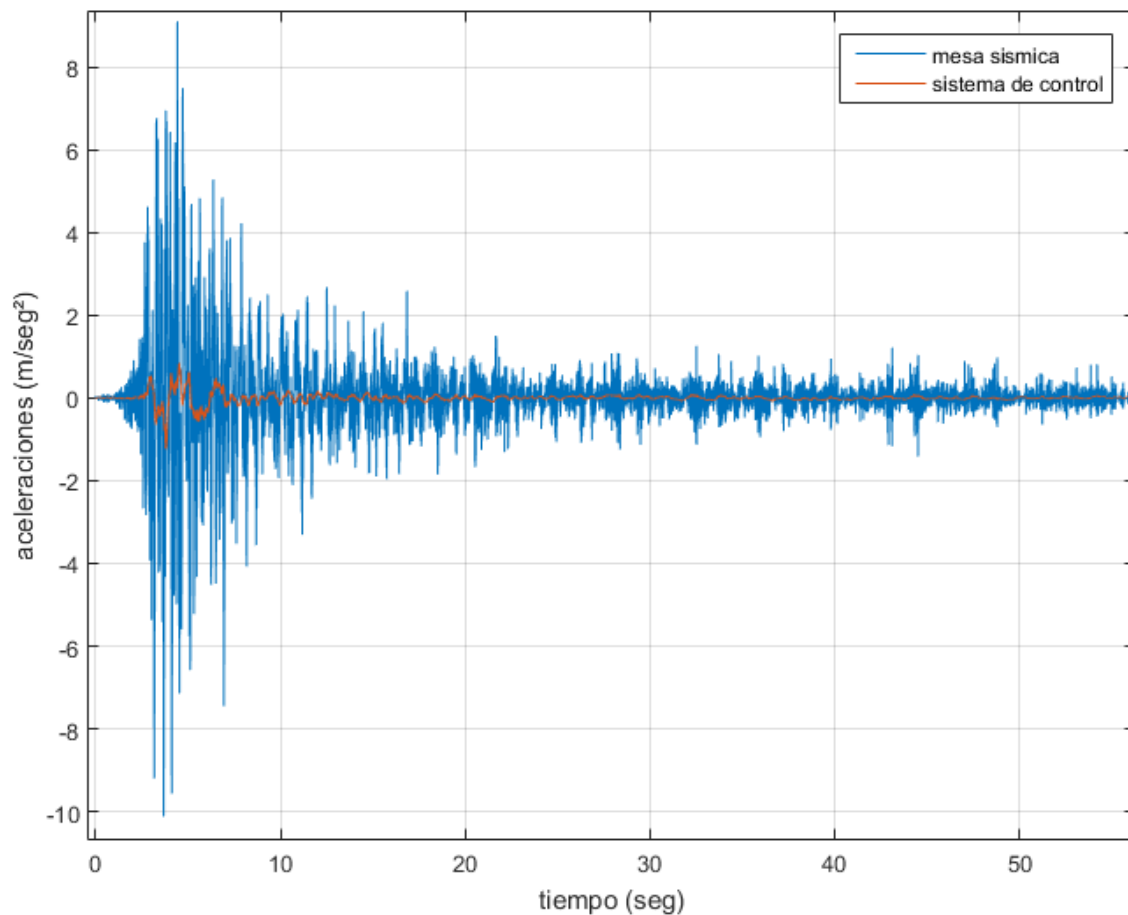


Figura 35. Sismo de Armenia aplicado al sistema de control sin estructura Benchmark.

Los siguientes ensayos consisten en el mismo sistema de control, pero removiendo el amortiguador único de 3 imanes tipo 1 (figura 14), el cual fue retirado con la hipótesis de que era este el causante del fenómeno de 'armónicos de respuesta'. El amortiguamiento pasaría a ser controlado únicamente por una platina de aluminio al frente de uno de los imanes restauradores superiores. Se empieza por ensayar el sistema de control sin la estructura acoplada. El primer ensayo es un barrido de frecuencias desde 0.4 a 12Hz y una amplitud de 5mm. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 36 y En la figura 37 se presenta el ensayo en el dominio de frecuencias:

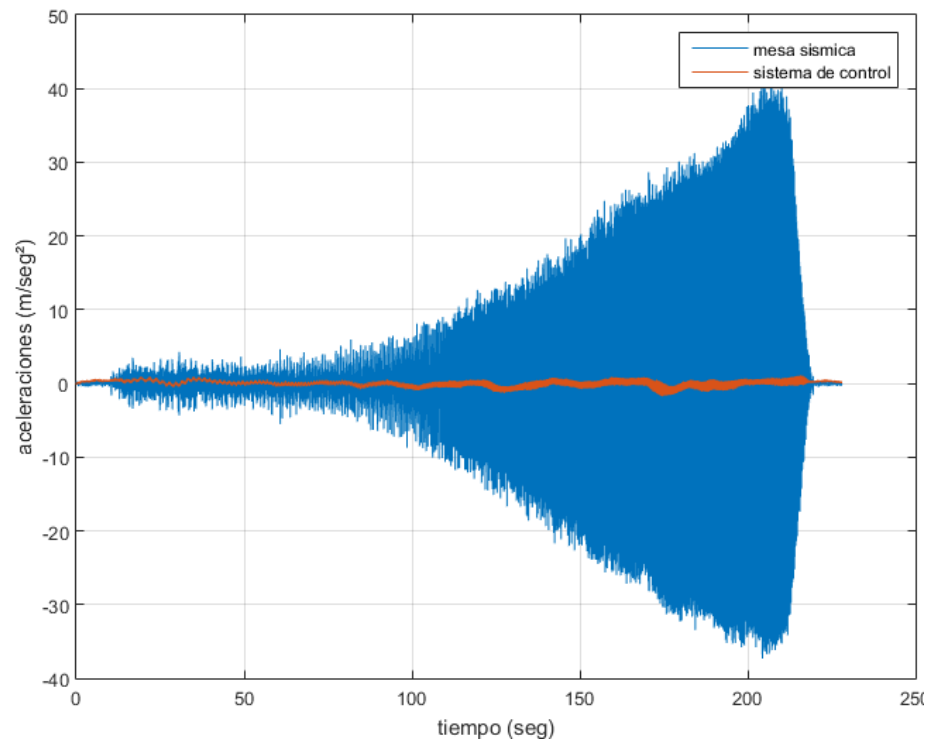


Figura 36. Ensayo de barrido aplicado al sistema de control sin imanes amortiguadores.

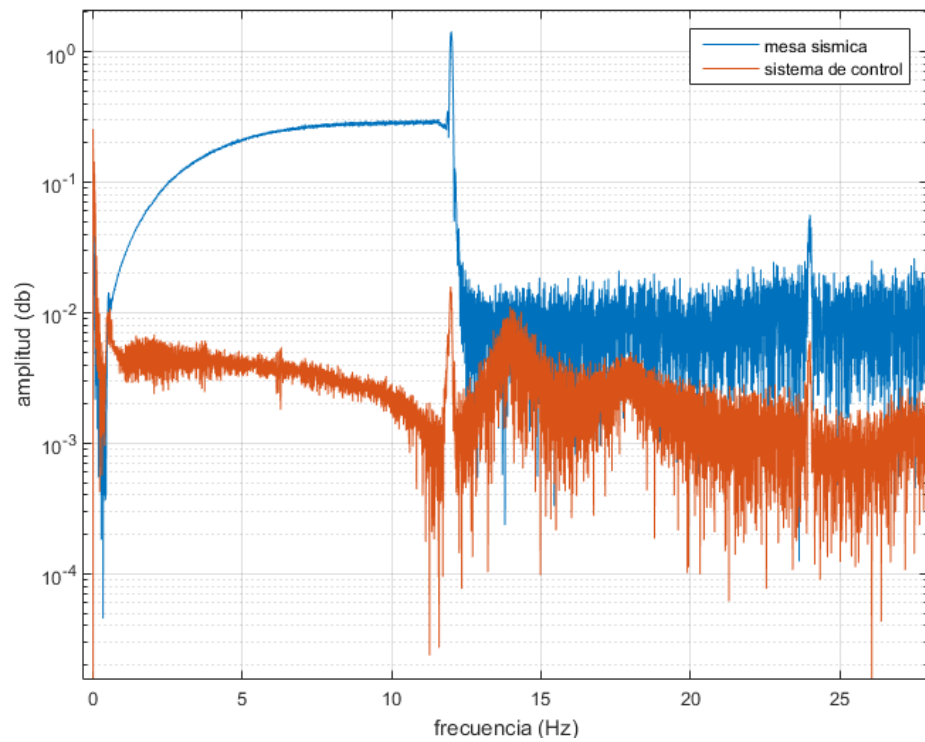


Figura 37. Dominio de frecuencias para el ensayo de barrido al sistema de control.

Se puede ver que en las frecuencias adyacentes a 14Hz hubo un aumento de amplitudes, mientras que las frecuencias adyacentes a 11.5Hz son de amplitud relativamente baja. Se realizó un análisis a la señal en el tiempo para el tramo de 198 a 198.4 segundos. Como se observa en la figura 38, el ensayo de barrido provocó nuevamente la aparición de ‘armónicos de respuesta’, pero en esta ocasión son menos uniformes. Se hace la observación que un mayor amortiguamiento le brinda estabilidad al sistema homogeneizando las frecuencias de respuesta.

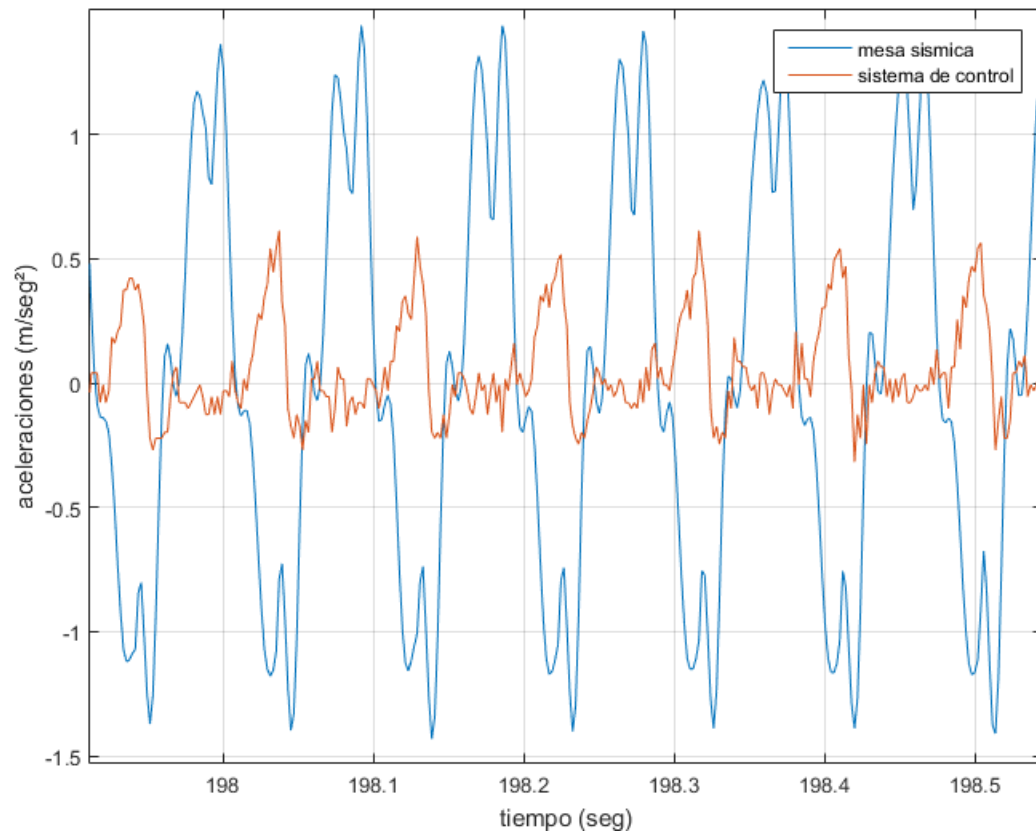


Figura 38. Acercamiento a la figura 50 en el segundo 198, las aceleraciones de la mesa sísmica se muestran al 4%.

Posteriormente se ensayó la estructura Benchmark con el sistema de control acoplado. Como se puede observar en la figura 39 las aceleraciones de respuesta son mayores a las aceleraciones cuando el sistema de control contaba con mayor cantidad de imanes amortiguadores. En la figura 40 se presenta los resultados en el dominio de frecuencias para la mesa sísmica y el sistema de control.

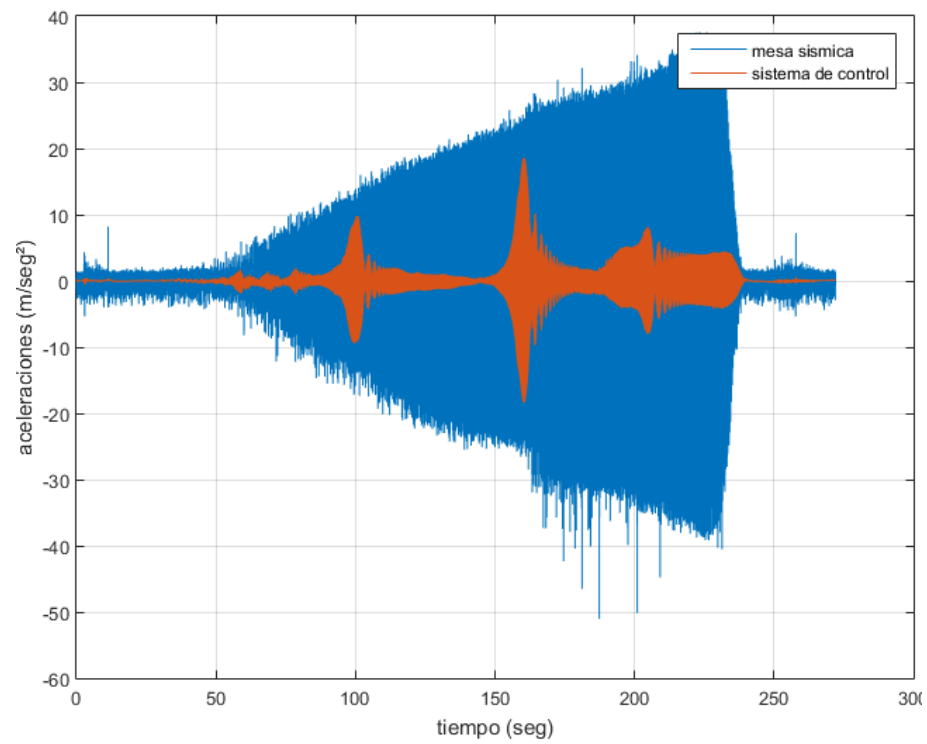


Figura 39. registro de respuestas del sistema de control con estructura Benchmark acoplada bajo barrido de frecuencias.

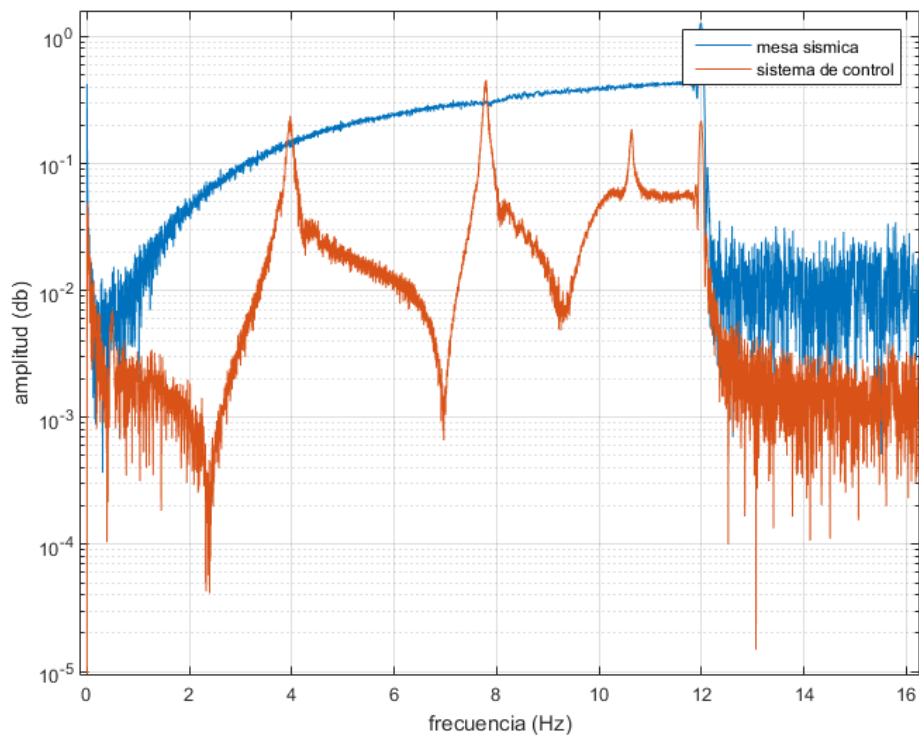


Figura 40. Registro de la figura 53 trasladado a dominio de frecuencias.

Las frecuencias naturales del sistema de control se mantienen iguales a las de la figura 29 porque el único cambio fue la disminución de amortiguamiento. La figura 41 expone las aceleraciones del sistema de control y la estructura Benchmark. Posteriormente se muestra la figura 42 con las señales del sistema de control y los tres pisos de la estructura Benchmark en el dominio de frecuencias.

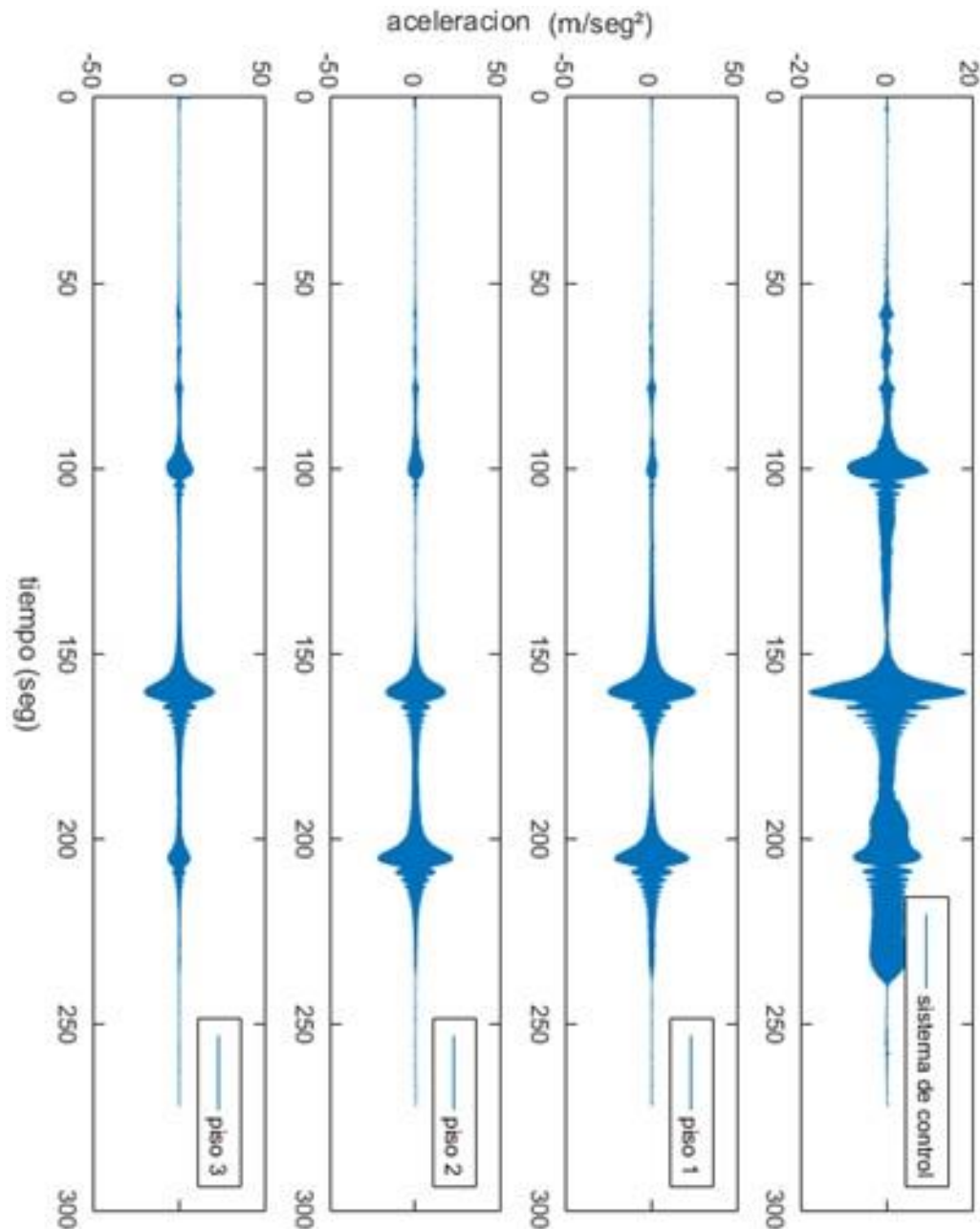


Figura 41. Respuestas en el tiempo para una excitación tipo barrido, sin caja de imanes amortiguadores.

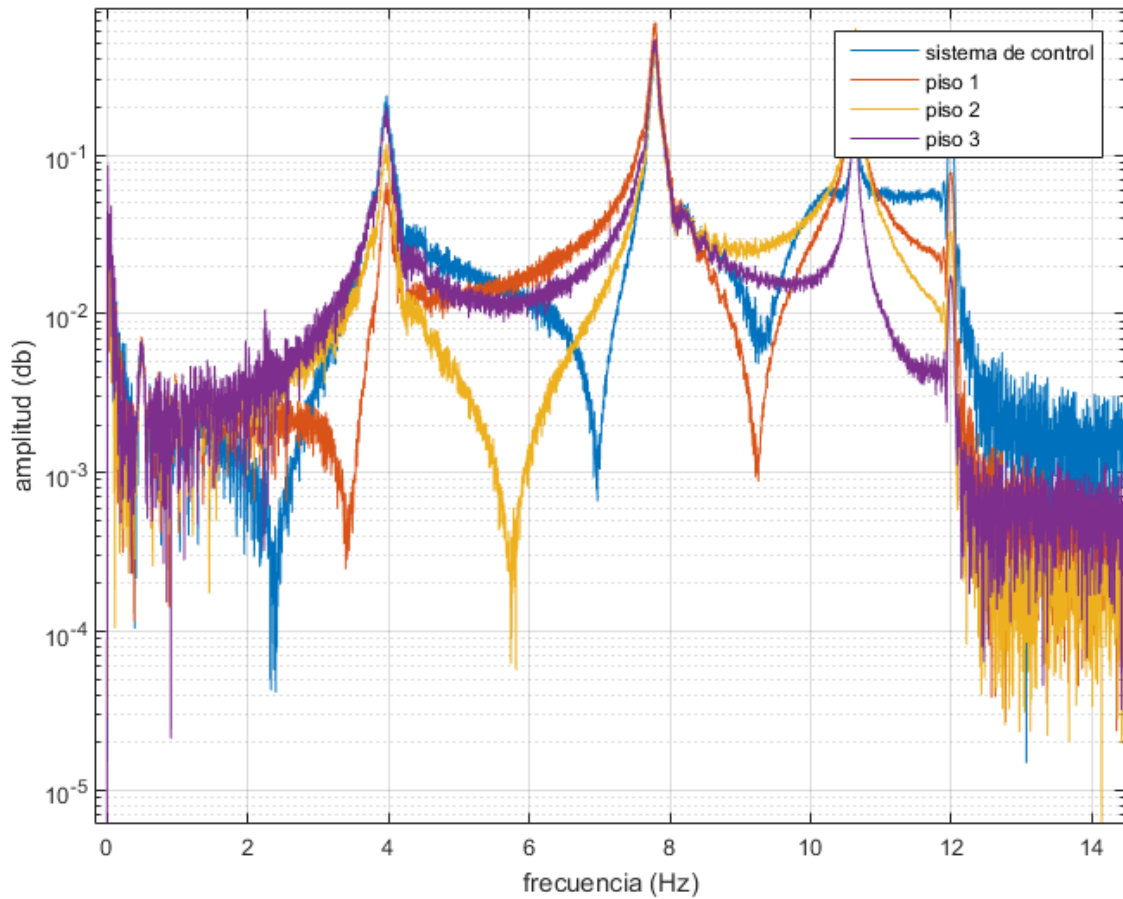


Figura 42. Dominio de frecuencias de las respuestas para el sistema de control y la estructura Benchmark bajo excitación tipo barrido.

La figura 43 muestra la comparativa en el dominio del tiempo entre las respuestas del piso 1 del ensayo de la estructura Benchmark con el sistema de control acoplado y la respuesta del modelo del mismo piso sin sistema de control excitado bajo la misma señal del ensayo, la cual consiste en una carga sísmica tipo barrido de frecuencias. La figura 44 traslada esta comparativa al dominio de frecuencias. Las figuras 11 a 14 del anexo 3 presentan las comparativas de los otros pisos.

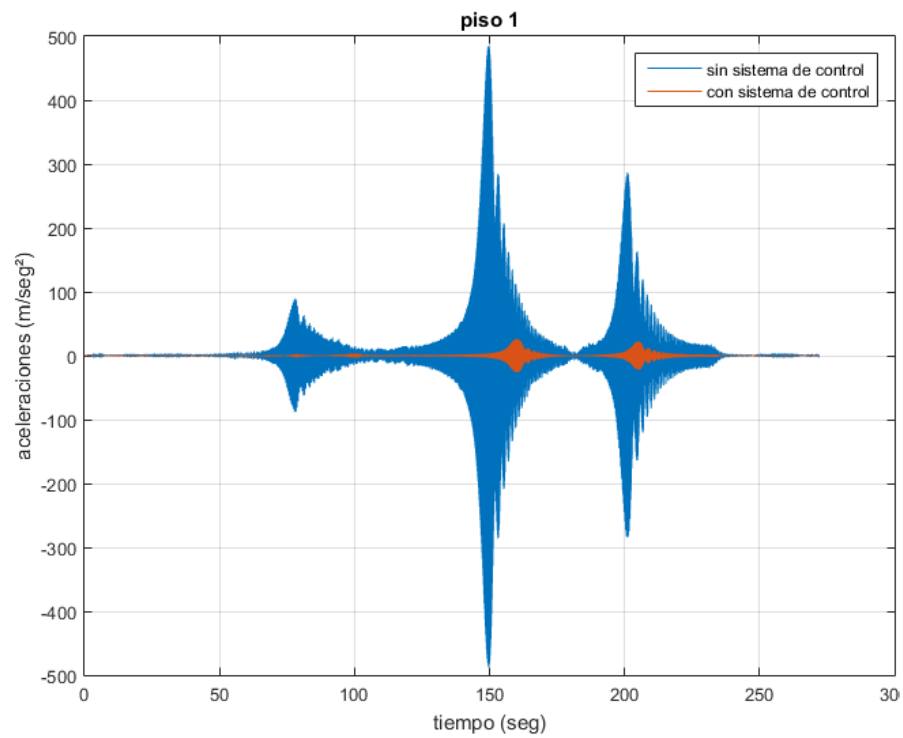


Figura 43. Comparativa en el tiempo para el piso 1 bajo carga sísmica tipo barrido con y sin sistema de control.

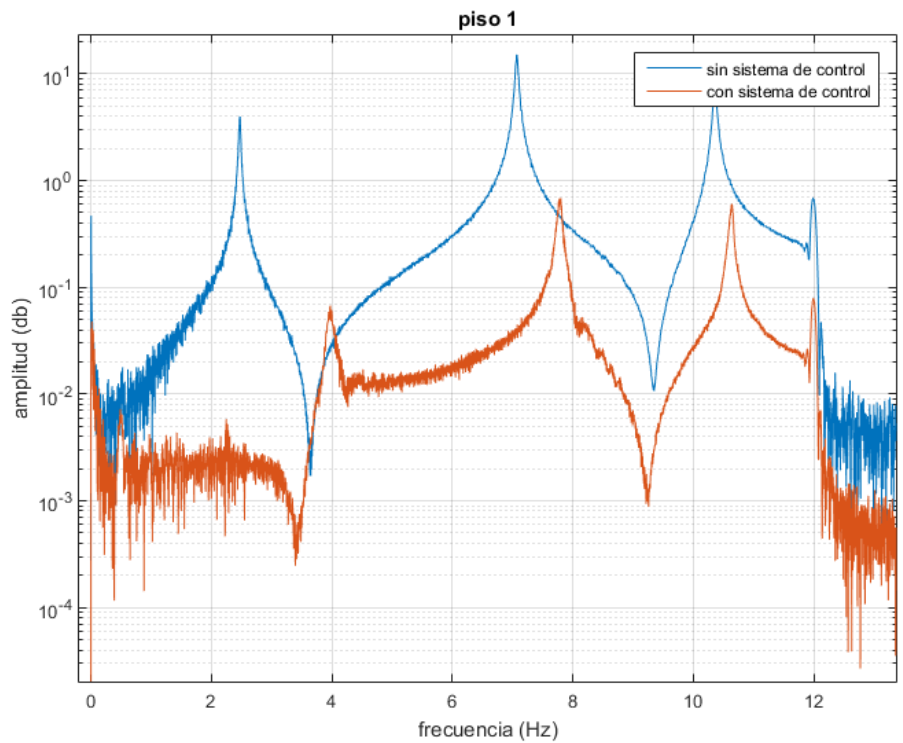


Figura 44. Comparativo en el dominio de frecuencias para el piso 1 bajo carga sísmica tipo barrido con y sin sistema de control.

La disminución de aceleraciones máximas fue de: 94.6% para el piso 1, 93.5% para el piso 2 y del 94.9% para el piso 3.

A modo de comparación se calculó cuánto porcentaje en la aceleración máxima se reduce al utilizar la caja de imanes mostrada en la figura 14. La comparativa es posible porque ambos ensayos con la estructura Benchmark acoplada son iguales. En la figura 45 se muestra la diferencia de respuesta del sistema de control en el dominio de frecuencias con y sin la caja de imanes amortiguadores acoplada, la misma comparación se realiza para los pisos de la estructura Benchmark en las figuras 15 a 17 del anexo 3. Como es lógico, al utilizar la caja de imanes amortiguadores las aceleraciones máximas son menores, en la tabla 4 se muestra la reducción porcentual de aceleración máxima al usar la caja respecto a no usarla.

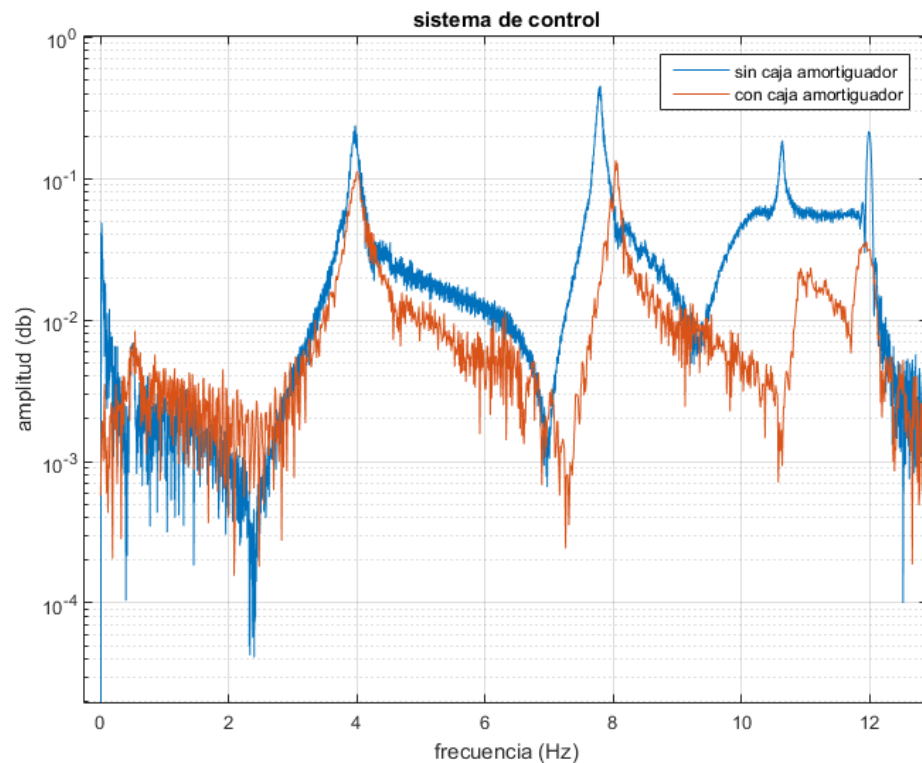


Figura 45. Comparativa en el dominio de frecuencias de la respuesta del sistema de control con y sin caja de imanes amortiguadores.

Tabla 4. Porcentajes de reducción de aceleraciones absolutas máximas con y sin caja de imanes amortiguadores.

Grado de libertad	% de reducción
Sistema de control	82.2
Piso 1	84.5
Piso 2	85.5
Piso 3	81.9

Conclusiones

Las aceleraciones máximas para diferentes excitaciones sísmicas se mantuvieron bajas, sobre todo cuando el sistema de control tenía la caja de imanes amortiguadores acoplada. Es importante señalar dos factores negativos del sistema de control: trabajar con imanes para rigidizar el sistema funciona, en la medida en que a bajos desplazamientos la fuerza restauradora es baja, pero su manipulación es laboriosa, utilizar imanes de alta potencia en escala real sería una actividad complicada y causaría costos superiores a sistemas de control que no usen imanes.

El efecto exponencial de la rigidez magnética puede ser replicado con otros sistemas de control más fáciles de manipular, como por ejemplo los sistemas de control con esferas sobre soportes cónicos (figura 2). El segundo factor negativo del sistema de control consiste en el cálculo de la respuesta dinámica. A escala real es necesario saber las respuestas dinámicas de desplazamiento y velocidad a las cuales responde el sistema de control bajo excitaciones sísmicas en la base. El modelo de estas propiedades dinámicas no pudo ser obtenido en este proyecto debido a la dificultad de modelar el amortiguamiento no lineal.

Al usar el sistema de control desarrollado las aceleraciones de los tres grados de libertad de la estructura Benchmark se redujeron por encima del 90%. La diferencia de las respuestas de la estructura al desacoplar la caja de los imanes amortiguadores del sistema de control no es superior al 20% (véase la tabla 4), esto da significancia a las propiedades dinámicas que otorga el dispositivo de amortiguamiento por inducción de corrientes de Foucault.

TRABAJO FUTURO

El sistema de control presentado tiene el potencial para convertirse en el primero de múltiples sistemas de control amortiguados magnéticamente y sistemas de aislamiento soportados por esferas. El trabajo que requiere la investigación es la caracterización de la función de amortiguamiento, lo cual se consigue haciendo ensayos de histéresis a diferentes frecuencias de oscilación. Teniendo el valor del amortiguamiento en función de la velocidad se puede realizar el diseño de sistemas de amortiguamiento magnético aplicables en estructuras aisladas con sistemas de control pasivo.

Actualmente ya se encuentran en uso los amortiguadores reológicos. La diferencia entre estos amortiguadores y los amortiguadores hidráulicos consiste en que el aceite interno de los amortiguadores reológicos contiene finas partículas de hierro y las válvulas de presión interna tienen acoplados electroimanes. Cuando se pasa corriente por los electroimanes, estos crean un campo magnético que cambia la facilidad con la que pasa el aceite (el cual contiene partículas de hierro) por las válvulas internas, cambiando instantáneamente las propiedades del amortiguador. La figura 46 muestra un ensayo de histéresis de un amortiguador reológico

caracterizado por Ghorbany (2011), se puede ver que, aunque no se ejerza voltaje en el electroimán (0 Amperios) el amortiguador funciona como un amortiguador hidráulico.

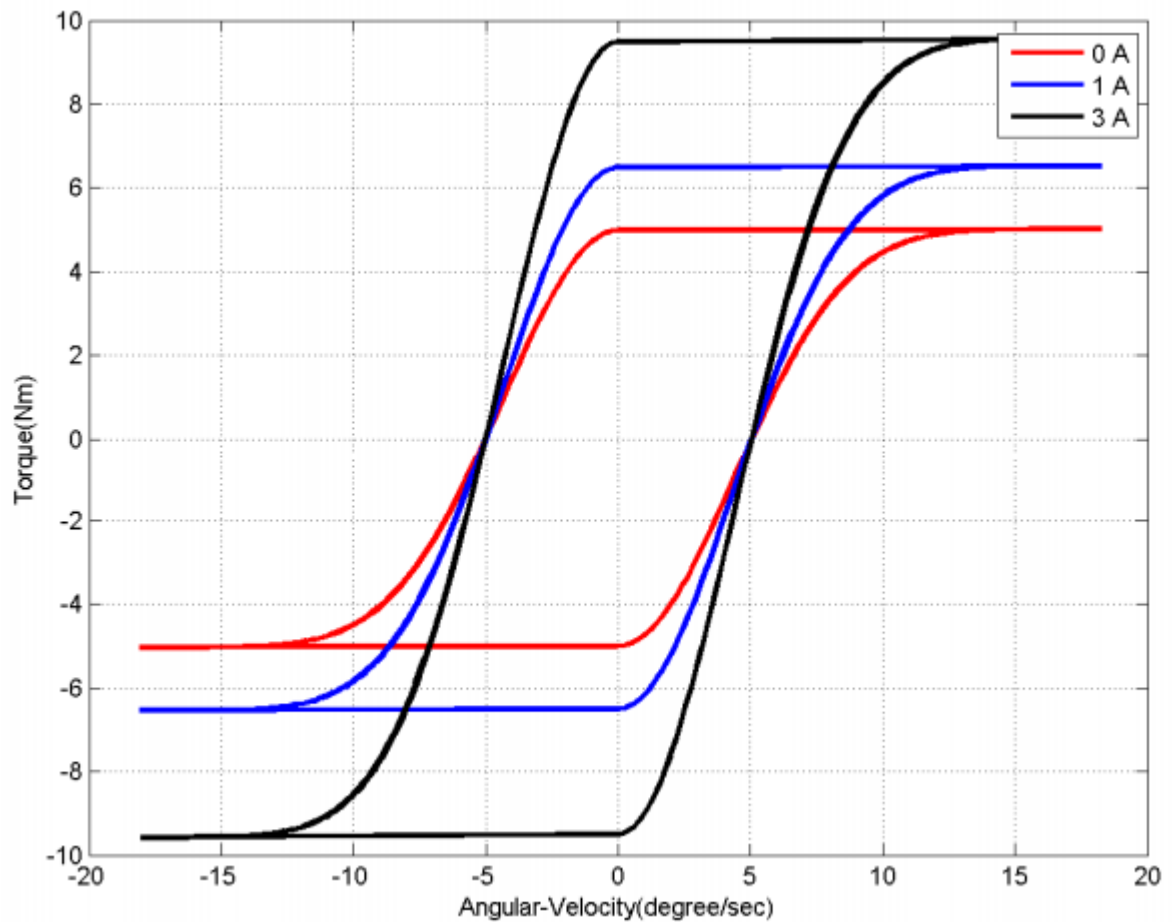


Figura 46. Ensayos de histéresis en un amortiguador reológico con amperaje variable sobre el electroimán

La figura 46 también concluye que la fuerza que ejerce el amortiguador es proporcional al amperaje en el electroimán. Se puede sustituir el electroimán por un imán permanente y el sistema de control se vuelve pasivo pero la histéresis tendrá un aspecto permanente. La bibliografía de amortiguadores reológicos es nutrida con investigaciones que concluyen con funciones de fuerza-velocidad definidas. El área de investigación de sistemas de control semi-activos puede beneficiarse de este tipo de amortiguadores.

Referencias

- BASSANI, R. Levitation of passive magnetic bearings and systems. *Tribology International*, 2006. ISSN 0301-679X.
- BINGHAM, R. Harmonics—understanding the facts; 2010.
- CEPAL, P. El terremoto de enero de 1999 en Colombia: Impacto socioeconómico del desastre en la zona del Eje Cafetero. Comisión Económica para América Latina y el Caribe—CEPAL, 1999.
- CHOPRA, A. K. Dynamics of structures : theory and applications to earthquake engineering. Englewood Cliffs, 1995. ISBN 0138552142.
- DE ORO, A. L. V. et al. AN INTERACTIVE APLICATION FOR EDUCATION IN STRUCTURAL DYNAMICS. *Dyna-Colombia*, 2011. ISSN 0012-7353.
- FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. The Feynman Lectures on Physics, Desktop Edition Volumen II. Basic Books, 2013. ISBN 0465072933.
- FIORILLO, F. Chapter 2 - Soft Magnetic Materials. In: (Ed.). Characterization and Measurement of Magnetic Materials. San Diego: Academic Press, 2004. ISBN 15672131.
- GHORBANY, D. MR damper hysteresis characterization for the semi-active suspension system. 2011. University of Agder
- GOMASE, O.; BAKRE, S. Performance of non-linear elastomeric base-isolated building structure. *J. of Civil & Structural Eng.*, 2011.
- GOMEZ, D.; MARULANDA, J.; THOMSON, P. Control systems for dynamic loading protection of civil structures. *Dyna-Colombia*, 2008. ISSN 0012-7353.
- HIBBELER, R. C. Engineering Mechanics: Statics and Dynamics: Prentice-Hall, 2013.
- KRAVCHUK, N.; COLQUHOUN, R.; PORBAHA, A. Development of a Friction Pendulum Bearing Base Isolation System for Earthquake Engineering Education. *Proc. of the 2008 American Society for Engineering Education Pacific Southwest Annual Conf.*, 2008.
- MING, Q.; KACHROO, P. Modeling and control of electromagnetic brakes for enhanced braking capabilities for automated highway systems. *Proceedings of Conference on Intelligent Transportation Systems*, 1997.
- MOHAMAD ZAIRI, B. et al. Eddy Current Braking Study for Brake Disc of Aluminium, Copper and Zink. 2011.
- RAMALLO, J. C.; JOHNSON, E. A.; SPENCER, B. F.; base isolation systems. *Journal of Engineering Mechanics-Asce*, 2002. ISSN 0733-9399.

SERWAY, R. A.; JEWETT, J. W. Physics for scientists and engineers with modern physics. 2013. ISBN 1285657578.

SHIN, K. On the Performance of a Single Degree-of-Freedom High-Static-Low-Dynamic Stiffness Magnetic Vibration Isolator. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014. ISSN 2234-7593.

URONE, P. P. et al. College physics. OpenStax College, 2012. ISBN 1938168003.

VELEZ, W.; GOMEZ, D.; THOMSON, P. FINITE ELEMENT MODEL UPDATING. Dyna-Colombia, 2009. ISSN 0012-7353.

WINN, W. Introduction to Understandable Physics: Electricity, Magnetism and Light, 2010. ISBN 9781452015903.

Woodford, Chris. (2012) Eddy-current brakes. Retrieved from <http://www.explainthatstuff.com/eddy-current-brakes.html>. [2016/11/24]